

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

На правах рукописи

Репин Александр Сергеевич



Разработка методики геодезического обеспечения
геопространственного мониторинга бугров пучения
многолетнемерзлых пород

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Мурзинцев Петр Павлович

Новосибирск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ФОРМАХ РЕЛЬЕФА.....	10
1.1 Исторический аспект исследований многолетнемерзлых форм рельефа.....	10
1.2 География распространения многолетнемерзлых форм рельефа.....	14
1.3 Существующие методики мониторинга многолетнемерзлых пород.....	18
1.3.1 Исследование динамики развития бугров пучения методом гео- радиолокации.....	18
1.3.2 Исследование результатов гравиметрических наблюдений.....	19
1.3.3 Методы исследования динамики развития бугров пучения с использованием метеоданных.....	21
Выводы по первому разделу.....	24
2 АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....	26
2.1 Распространение многолетнемерзлых форм рельефа в районе прове- дения работ.....	26
2.2 Влияние многолетнемерзлых форм рельефа на проектирование, строи- тельство и эксплуатацию линейных сооружений.....	27
2.3 Геопространственный мониторинг инженерных сооружений на нефте- газовых месторождениях Крайнего Севера.....	40
2.3.1 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Бованенковском месторождении.....	40
2.3.2 Оценка устойчивости насыпных инженерных сооружений при геопространственном мониторинге на нефтегазовых месторож- дениях.....	45
2.3.3 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Самбургском месторождении.....	52

2.3.4 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Олимпийском лицензионном участке	55
2.3.5 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Агапском лицензионном участке	58
2.4 Анализ методики геопространственного мониторинга на нефтегазовых месторождениях	62
Выводы по второму разделу	68
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БУГРОВ ПУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД	70
3.1 Разработка методических рекомендаций по производству инженерно-геодезические изысканий при ведении геопространственного мониторинга в районах с буграми пучения вечной мерзлоты	70
3.2 Определение коэффициента корреляции моделей температурный полей на Самбургском месторождении и Агапском лицензионном участке	82
3.3 Определение величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород.....	87
3.4 Исследование светодиодной насадки на отражатель электронного тахеометра для повышения производительности труда инженерно-геодезических изысканий в районах Крайнего Севера.....	93
3.5 Методика геодезического обеспечения геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород.....	102
Выводы по третьему разделу	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НАРУЖНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ.....	128

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ НАСАДКА СВЕТОДИОДНАЯ СЪЕМНАЯ НА ОТРА- ЖАТЕЛЬ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ОБЪЕДИНЕННАЯ СХЕМА ГЕОПРОСТ- РАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БУГРОВ ПУЧЕНИЯ...	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность научного исследования. Нефтегазодобывающая отрасль играет важнейшую роль в экономике Российской Федерации (РФ). Подавляющее большинство нефтегазовых месторождений расположены в районах Крайнего Севера, за Полярным кругом.

В настоящее время ведутся активные инженерные изыскания для обустройства Самбургского, Агапского, Олимпийского и других месторождений, на территории которых имеются многочисленные бугры пучения многолетнемерзлых пород (ММП). Без качественного геодезического обеспечения и последующего геопространственного мониторинга инженерных сооружений, бугров пучения на этапах, изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводов невозможно обеспечить эффективную добычу и транспортировку нефти и газа.

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в пределах криолитозоны приводят к трансформации геокриологических процессов, развивающихся как в зонах непосредственного взаимодействия с трубопроводами, так и на прилегающих к ним территориях. Это приводит к активизации опасных природных процессов с их негативным влиянием на техническое состояние трубопроводов, нередко приводящим к аварийным ситуациям, которые в свою очередь могут привести к серьезным экологическим и экономическим последствиям. Поэтому разработка методики геодезического обеспечения геопространственного мониторинга бугров пучения является актуальной научно-технической задачей, играющей важное значение для развития экономики РФ.

Степень разработанности темы. Изучение многолетнемерзлых форм рельефа проводятся достаточно длительное время, первые исследования были проведены в 1792 г. в Исландии. Значительный вклад в эти исследования внесли работы Палссона С., Подьяконова С. А., Городкова Б. Н., Попова А. И., Шумского П. А., Васильчука Ю. К., Пономаревой О. Е. и др.

Изучению вопросов геодезического мониторинга инженерных сооружений посвящены работы Антоновича К. М., Брыня М. Я., Васютинского И. Ю., Карпика А. П., Ключина Е. Б., Комиссарова А. В., Лисицкого Д. В., Мазурова Б. Т., Мелкого В. А., Мустафина М. Г., Никитина А. В., Пимшина Ю. И., Рязанцева Г. Е., Соловицкого А. Н., Столбова Ю. В., Хлебниковой Т. А., Хорошилова В. С., Уставича Г. А., Шоломицкого А. А., Щербакова В. В., Ямбаева Х. К. и др.

Комплексный пространственный мониторинг бугров пучения многолетнемерзлых пород не осуществлялся в полном объеме в связи с отсутствием методик построения единой модели надземной и подземной его составляющей.

Цель и задачи научного исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методики геодезического обеспечения геопро пространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород в районах Крайнего Севера на территориях, подверженных природным и техногенным аномальным явлениям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *основные научно-технические задачи*:

- выполнить анализ существующих отечественных и зарубежных методик мониторинга бугров пучения, а также нормативной литературы в области инженерных изысканий и строительства в районах распространения вечной мерзлоты;
- разработать классификацию бугров пучения многолетнемерзлых пород и классификацию деформаций магистральных трубопроводов;
- разработать алгоритм оценки бокового воздействия бугров пучения на трубопровод;
- разработать способ определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих для бугров и площадей пучения ММП;
- разработать и внедрить в производство методику геодезического обеспечения геопро пространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород;
- предложить технологическое решение для повышения производительности труда при выполнении геодезических измерений электронным тахеометром для районов Крайнего Севера.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований являются территории нефтегазовых месторождений, подверженные аномальным явлениям природного и техногенного характера.

Предметом исследования является геодезический пространственный мониторинг бугров пучения многолетнемерзлых пород.

Научная новизна диссертационных исследований состоит в следующем:

– предложена классификация бугров пучения многолетнемерзлых пород, которая на этапах рекогносцировки и производства инженерных изысканий позволяет принять оптимальные предпроектные решения для размещения площадных и линейных объектов нефтегазовых комплексов;

– разработана классификация деформаций магистральных трубопроводов, позволяющая оценить характер влияния на эксплуатацию трубопровода и возможности по увеличению срока его эксплуатации;

– разработана методика геопро пространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих бугров пучения с прогнозами их развития.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость выполненного исследования заключается в разработке алгоритма прогнозирования деформаций пространственного положения трубопровода с учетом «бокового» воздействия бугра пучения, его наземной и подземной составляющих.

Практическая значимость определяется возможностью принятия оптимальных предпроектных решений на этапе инженерных изысканий по размещению на местности коридоров линейных коммуникаций и площадных объектов нефтегазового комплекса.

Методология и методы исследований.

Методологической базой исследования являлся системный подход, в основе которого лежит рассмотрение территории нефтегазовых месторождений, подвер-

женные аномальным явлениям природного и техногенного характера, как системы и совокупности взаимодействующих объектов.

Теоретической базой исследования являются теоретические работы ученых и специалистов в области изучения многолетнемерзлых форм рельефа и геопространственного мониторинга.

Эмпирической базой исследования являются выполненные ранее работы по исследованию многолетнемерзлых форм рельефа. При выполнении исследований использованы методы математической обработки геодезических измерений и моделирования, и математического анализа. В качестве программного обеспечения для обработки полученных результатов и оценки точности использовались программные продукты: программный комплекс CREDO, MapInfo, Microsoft Office Excel.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанный способ определения величины и направления деформаций наружной и подземной составляющих бугров пучения многолетнемерзлых пород позволяет построить общую 3D-модель бугров и осуществить прогноз развития деформаций;

– методика геодезического обеспечения геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород и алгоритм оценки влияния бугров пучения на коридор линейных коммуникаций позволяют принять оптимальные решения по его размещению на этапе предпроектной подготовки с повышением безопасности и увеличением сроков эксплуатации;

– технологическое решение, существенно повышающее производительность труда при выполнении геодезических измерений в районах Крайнего Севера.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика и содержание диссертации соответствуют области исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных со-

оружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтедобывающих комплексов; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты исследований, выводы и практические рекомендации по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск) в 2016 и 2020 гг. и на Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию К. И. Сатпаева. (г. Усть-Каменогорск) в 2019 г.

Разработанные технологические решения использовались при проведении инженерно-геодезических изысканий ООО «Градостроительное проектирование и инженерно-строительные изыскания «Гипронг-Транс» на месторождениях Крайнего Севера, в районах расположения многолетнемерзлых пород.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в восьми публикациях, из которых две опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна статья опубликована в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, получен патент Российской Федерации на полезную модель и патент Российской Федерации на изобретение.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 130 страниц печатного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 104 наименования, содержит 11 таблиц, 57 рисунков, 3 приложения.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ФОРМАХ РЕЛЬЕФА

1.1 Исторический аспект исследований многолетнемерзлых форм рельефа

История исследований бугров пучения рассмотрена в трудах профессора географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д.г.-м.н., действительного члена Российской академии естественных наук Васильчука Ю. К. [21]. В 1792 г. Палссоном Свенном были проведены первые исследования многолетнемерзлых пород. В начале XIX в. крупные бугры были обнаружены в тундрах Северной Америки, но долгое время их рассматривали как наносные образования, а затем как эрозионные останцы.

В 1890 г. Кильман О. выполнил описание подобных форм рельефа на Кольском полуострове.

В течение первой половины XX в. проводились активные исследования бугров пучения, в результате которых выдвигались различные гипотезы возникновения и развития многолетнемерзлых форм рельефа. Так, Подьяков С. А. показал, что бугры пучения в наледях образуются не от напора потока, а от промерзания воды, замкнутой со всех сторон благодаря смерзанию верхнего ледяного покрова с ледяным дном. При проведении исследований на Северном Урале от р. Кара до низовий р. Оби (Ямало-Ненецкий автономный округ), Сукачев В. Н. предложил гипотезу образования бугров пучения в результате выпучивания плавунного горизонта, находящегося под слоем промерзающего торфа и границей вечной мерзлоты [21, 92]. Исследования Драницына Д. А., проводившиеся в низовьях р. Енисея, показали, что распространение и развитие бугристых торфяников приурочены к оси долины реки. Работы по определению происхождения торфяных бугров на Кольском полуострове в разное время проводились Ануфриевым Г. И., Сумгиным М. И. и Лавровой М. А., их исследования показали, что бугры являются не последствием

ледникового периода, а образованиями более позднего периода и при благоприятных физико-географических условиях могут образовываться и в настоящее время. Рихтер Г. Д. в своих исследованиях торфяных бугров на Кольском полуострове указывает на зависимость высоты бугров пучения от мощности снежного покрова на их вершине.

В работе «Вечная мерзлота в северном крае» Городков Б. Н. предлагает зонирование территорий распространения торфяных бугров с севера на юг в зависимости от изменений мерзлотных условий [25].

Одним из первых российских ученых, который провел комплексные исследования бугров пучения и внес значительный вклад в их изучение, был Попов А. И. Им были проведены измерения температуры грунта до глубины 20 м, определение естественной влажности и льдистости грунтов, а также выполнены исследования литологического разреза бугров пучения. Исходя из выполненных исследований Поповым А. И. приведены морфологические и морфометрические характеристики бугров пучения и области бугрового пространства многолетне-мерзлых пород [71].

В работе Шумского П. А. приводятся структурные и текстурные особенности, типы льда, рассматривается генетическая классификация ледяных горных пород и предлагается разделение бугров пучения на два типа: бугры со сплошным ледяным ядром и бугры из льдистых мерзлых пород [94].

В работах по исследованию бугров пучения в Западной Сибири Белопуховой Е. Б. предлагается выделять два вида бугров пучения: сезонные и многолетние, которые в свою очередь делятся:

- на бугры пучения, образовавшиеся без внешнего подтока воды;
- бугры пучения, образовавшиеся в результате воздействия напорных подземных вод;
- бугры пучения, образовавшиеся в результате перемещения грунтовых вод к границе промерзания.

По своему строению пучинные формы рельефа делятся на бугры и площади пучения [5, 14].

В 1960-х гг. Сеппалой М. активно проводились исследования многолетнемерзлых бугров пучения в финской Лапландии и Британской Колумбии [100].

В 1975 г. Васильчуком Ю. К. проводились исследования бугров пучения на Возейской нефтегазоносной площади, а с 1976 по 1982 г. – в устье р. Оби, в окрестностях поселка Азовы и на Ямале. В результате выполненных исследований были сделаны выводы, что при различных мерзлотно-фациальных процессах происходит рост, деградация или стабилизация бугров пучения, а также зависимости динамики их развития от аккумуляции осадков [21].

Радиоуглеродный анализ бугров пучения, выполненный в различных регионах, показал, что независимо от зон расположения бугры могут быть древними – 7–10 тыс. лет, молодыми – 2 тыс. лет и современными [51, 52].

При проведении полевых исследований Невечеря В. Н. выявил, что криогенное пучение происходит по единому принципу как при сезонном, так и при многолетнем промерзании пород. По наблюдениям в бассейне р. Надым с 1973 по 1976 г. им установлено, что бугры пучения высотой 0,65 и 0,73 м продолжали расти в высоту и изменились на 146 и 128 мм. Бугры пучения высотой от 2,5 до 5,0 м чаще всего деградируют, величина осадки составила более 200 мм. Однако в малоснежные зимы отмечался рост бугров пучения до 80 мм, это связано с увеличением мощности мерзлых пород под бугром. По данным Невечеря В. Н., при образовании бугра пучения скорость развития криогенных процессов составила от 200 до 250 мм в год, при этом мощность мерзлых пород увеличивается до 3 м. При достижении мощности мерзлых пород 8 м скорость криогенных процессов снижается до 7 мм в год, а при достижении мощности 10 м рост бугра пучения, при определенной мерзлотной обстановке, прекращается [61].

Карта распространения многолетнемерзлых грунтов на территории РФ приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Карта распространения многолетнемерзлых грунтов
на территории РФ [78]

В результате проведенного геофизического зондирования в северном Квебеке и построения математической модели Эн В. и Аллард М. выявили, что мощность многолетнемерзлых пород при среднегодовой температуре окружающей среды минус $5,8^{\circ}\text{C}$ изменяется от 3,5 м в понижениях рельефа до 22 м на возвышенных участках [96].

В своей работе, основанной на исследованиях бугров пучения в северной Шотландии, Зюйдхофф Ф. рассматривает процессы развития и деградации бугров пучения в зависимости от климата и других факторов. По результатам проведенных работ им предложена классификация стадий развития бугров пучения: эмбриональная, молодая, зрелая, деградационная и остаточная фаза. Также в ходе исследований выявлено, что процесс деградации бугра пучения максимально интенсивно проходит в условиях высокой температуры воздуха и большого количества осадков. Кроме этого, большое влияние на деградацию бугра пучения оказы-

вают такие факторы, как термоэрозия по боковым граням бугров, подтаивание снизу и ветровая эрозия [21, 104].

Для изучения динамики изменения бугров пучения по трассе газопровода Надым-Пунга Москаленко Н. Г. и Пономарёвой О. Е. проводились инструментальные измерения поверхности многолетнемерзлых форм рельефа. В результате выполненных исследований выявлено, что несмотря на потепление климата и снятие растительного покрова продолжается рост существующих бугров пучения и образование новых на тех участках, где растительный слой не был нарушен.

Также в работе отмечено, что при отсутствии обводненных ложбин происходит частичная деградация бугров пучения, на которых растительный покров был уничтожен в процессе строительства газопровода [70].

1.2 География распространения многолетнемерзлых форм рельефа

На современном этапе изучения многолетнемерзлых форм рельефа ведущими организациями являются географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и Институт криосферы Земли СО РАН.

Многолетнемерзлые бугры пучения являются одной из самых распространенных форм мерзлотного рельефа, они широко распространены во всем мире, встречаются чаще в районах с более высокими среднегодовыми температурами (около нуля) прерывистых по площади многолетнемерзлых пород, но также нередки и в зоне сплошных с поверхности многолетнемерзлых пород с низкими среднегодовыми температурами.

Схемы образования бугров пучения, согласно проводимым исследованиям различны, но их можно разделить на две основные группы, показанные на рисунке 2.

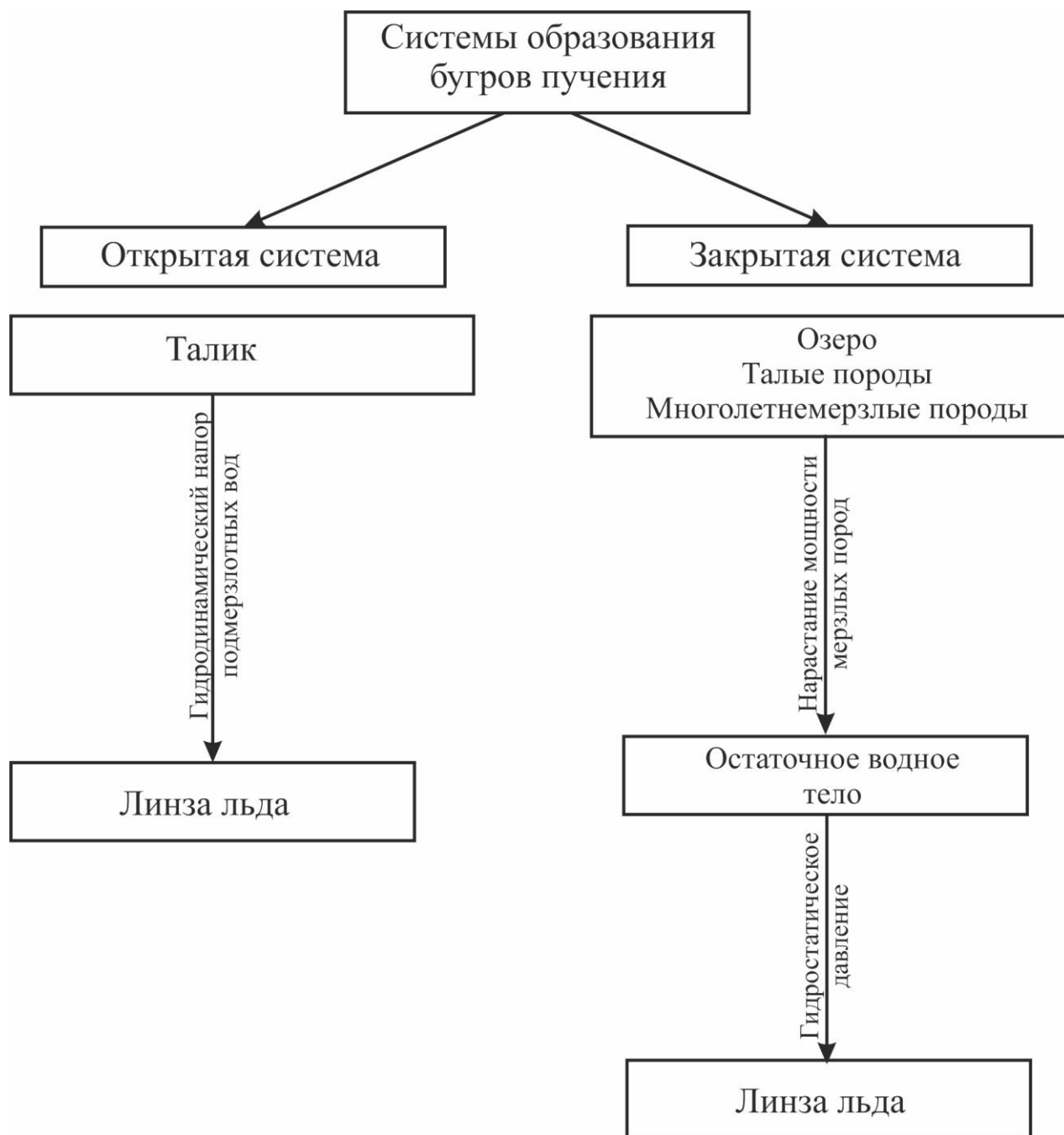


Рисунок 2 – Схема образования бугров пучения

По выполненному анализу истории исследований многолетмерзлых форм рельефа можно сделать вывод, что ареалом распространения бугров пучения являются территории, подверженные сезонному и многолетнему промерзанию.

Несмотря на глобальное потепление, постоянно происходит активизация мерзлотных процессов, что вызывает необходимость геодезического простран-

ственного мониторинга как возникающих новых бугров пучения, так и изучения развития уже известных многолетнемерзлых форм рельефа.

Степень потенциальной активизации мерзлотных процессов оценивается, в первую очередь, по доле площади ландшафта, которая может быть поражена этими процессами. К очень сильной степени активизации относится доля более 90 % площади ландшафта, к сильной – от 60 до 90 %, к средней – от 40 до 60 %, к умеренной – от 10 до 40 % и к слабой – менее 10 % [78]. Карта потенциальной активизации мерзлотных процессов приведена на рисунке 3.

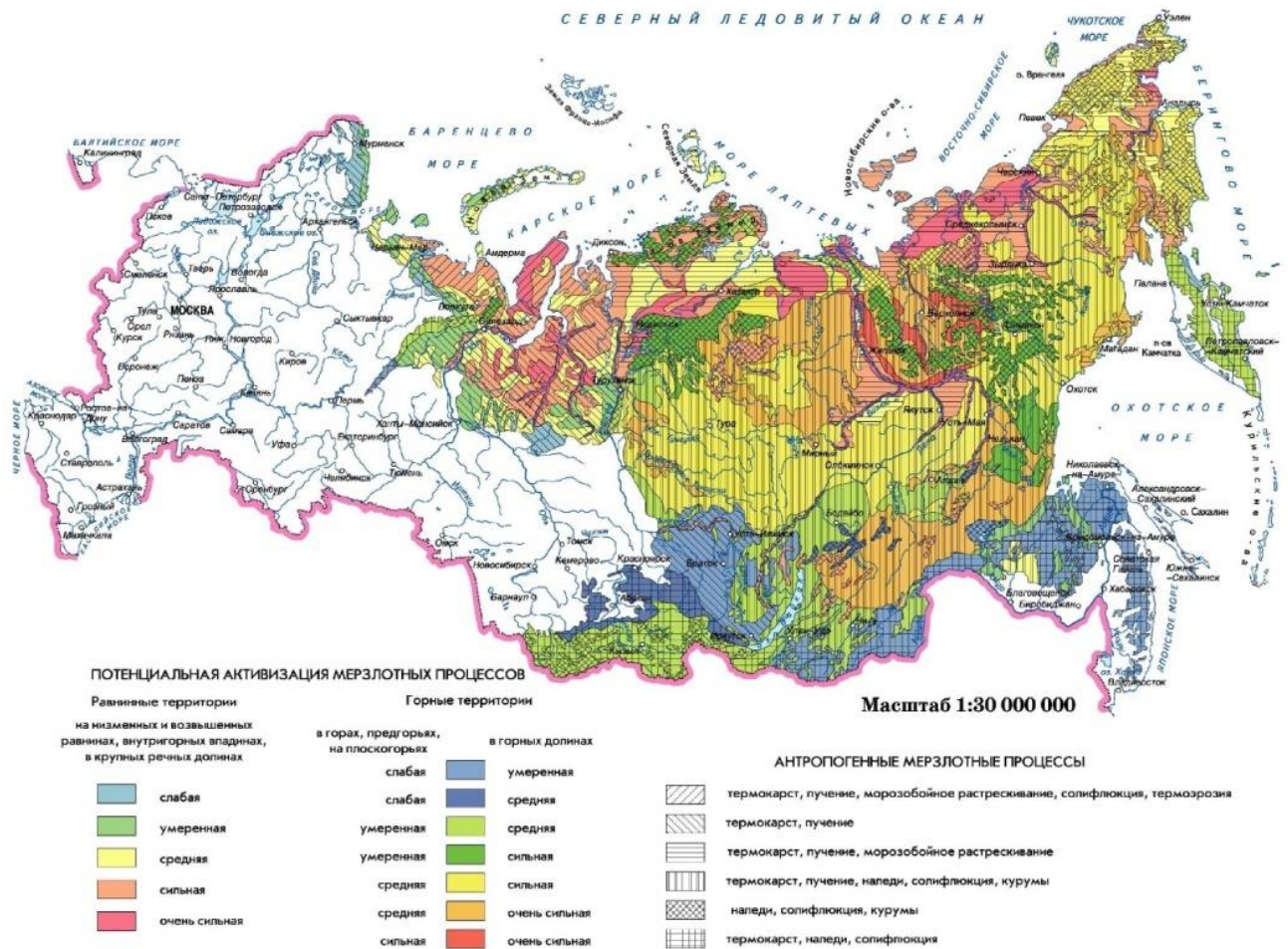


Рисунок 3 – Карта потенциальной активизации мерзлотных процессов [78]

По исследованиям, выполненным на территории России, бугры пучения выявлены в восточной и северной части Кольского полуострова, в низовьях р. Оби, в юго-восточной Западно-Сибирской низменности. Также пучение многолетне-

мерзлых пород широко распространено на Камчатке, Алтае, Дальнем Востоке и в Якутии [15, 21].

Современные миграционные плоские бугры пучения распространены в зоне регулярного подтопления лайды морскими водами. Конусовидные и тороидальные бугры являются реликтовыми, рисунок 4.



Рисунок 4 – Бугры пучения на острове Котельном [21]

Из исследований Васильчука Ю. К. бугры пучения – одно из самых распространенных криогенных явлений в Западной Сибири благодаря климатическим и гидрологическим особенностям данной территории.

Южная граница распространения бугров пучения в Западной Сибири проходит по 57° с. ш., северная граница заходит в зону сплошного распространения низкотемпературных многолетнемерзлых пород и достигает 70° с. ш. [14, 21].

В результате выполненного анализа исследований многолетнемерзлых форм рельефа предлагается классификация бугров пучения для целей геодезического мониторинга. Приведенная на рисунке 5 классификация является условной, так как одни и те же бугры пучения могут иметь отношение к разным группам.

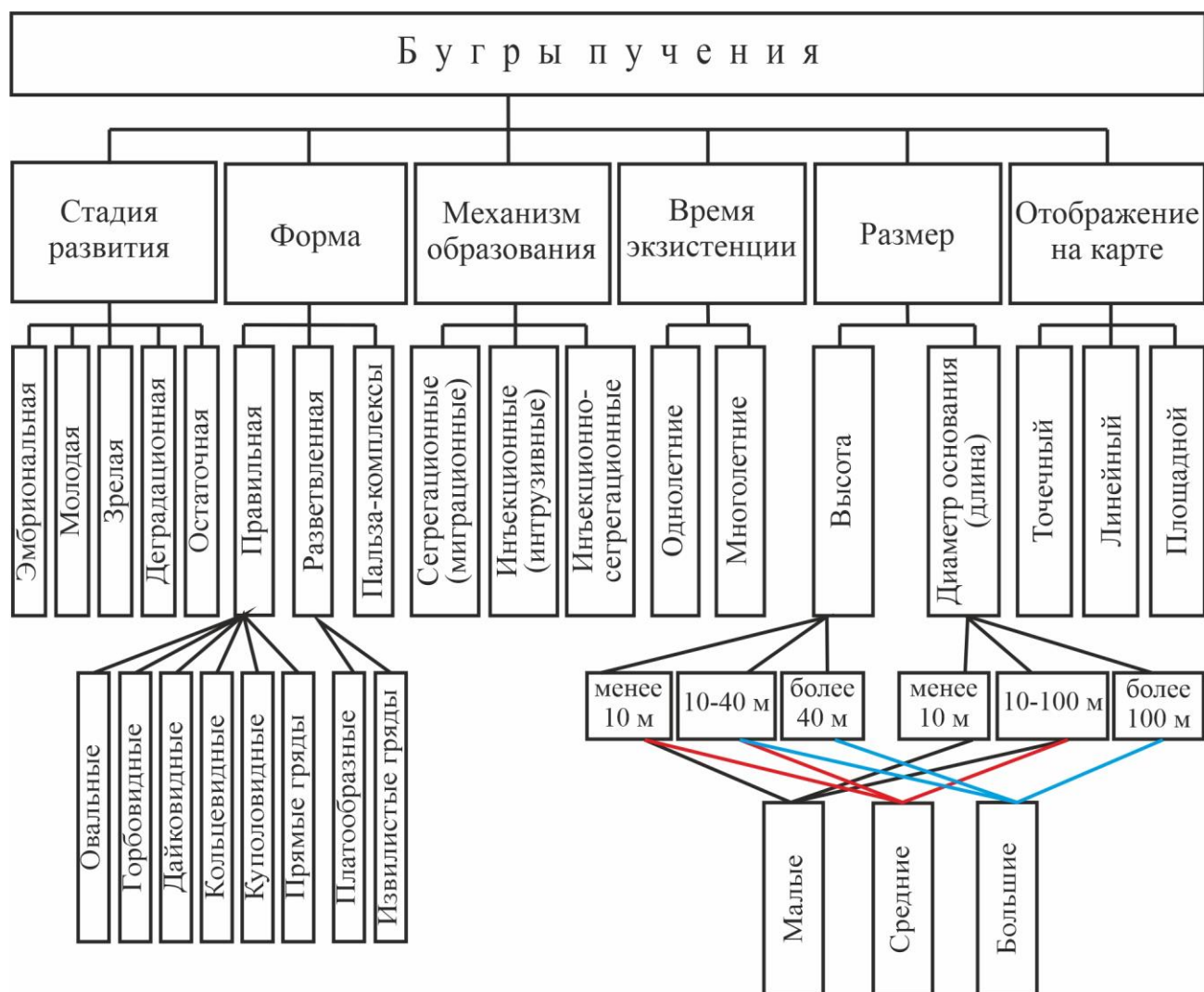


Рисунок 5 – Классификация бугров пучения для целей геодезического мониторинга

1.3 Существующие методики мониторинга многолетнемерзлых пород

1.3.1 Исследование динамики развития бугров пучения методом георадиолокации

Применение метода георадиолокации для исследования многолетнемерзлых пород, в сравнении с результатами сейсморазведки и электроразведки, дает более широкий спектр возможностей для геологического картирования и определения динамики развития бугров пучения.

В результате исследований по применению метода георадиолокации для изучения многолетнемерзлых грунтов, выполненных на геологическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, выявлены проблемы, связанные с влиянием различной степени засоленности мерзлых грунтов, что сказывается на оценке значений коэффициента отражения, а также поглощение и затухание электромагнитных волн на высоких частотах.

Широкое использование георадиолокации для исследования многолетнемерзлых грунтов вызвано различной диэлектрической проницаемостью грунтов, которые находятся в различном состоянии, мерзлом или талом [29].

На незасоленных грунтах измерения георадаром устойчиво определяли кровлю ММП, в то время как информативность георадиолокации уменьшалась при переходе от слабозасоленных пород к более засоленным. Аналогичные изменения на георадиограммах отмечались при переходе от мерзлых к растепленным участкам грунтов.

Наилучшие результаты применения метода георадиолокации выявлены при исследовании многолетнемерзлых пород в растепленном состоянии, что важно при деградации и разрушении бугра пучения, а также при выявлении и определении границ бугров пучения, не выраженных в рельефе. Результаты применения георадара давали более полную информацию о внутренней структуре бугров пучения, чем ландшафтное инженерно-геокриологическое картирование [29].

1.3.2 Исследование результатов гравиметрических наблюдений

Впервые для контроля разработки нефтегазоконденсатного месторождения гравиметрические наблюдения начали проводиться на Заполярном месторождении в 2003 г. Для отработки технологии создавалась сеть режимных и базисных опорных гравиметрических пунктов. Одновременно с созданием гравиметрической сети создавалась сеть геодезических пунктов, предназначенных для привяз-

1.3.3 Методы исследования динамики развития бугров пучения с использованием метеоданных

Институтом криосферы Земли СО РАН проводятся многолетние исследования динамики развития бугров пучения. Методы наблюдений приводятся в статье «Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара)» [70]. Исследования многолетнемерзлых пород проводились методом нивелирования поверхности бугров пучения от геодезических пунктов. Измерения проводятся с 1972 г., для измерений используется нивелирная сеть, состоящая из 500 точек, из них 350 точек расположены на профилях. Остальные точки располагаются на поверхности бугра пучения, в термокарстовой котловине и урочище плоскобугристых торфяников [70].

Для минимизации искажений результатов измерений за счет сезонного пучения грунтов нивелирование проводилось во второй половине августа. Полученные результаты наблюдений сопоставлялись с данными наблюдений метеостанции Надым.

Результаты метеонаблюдений показывают, что, несмотря на смягчение суровости климата и отсутствие изменений в количестве осадков, складывались благоприятные климатические условия для возникновения процессов пучения многолетнемерзлых пород. Также выявлена закономерность изменения рельефа бугров пучения от мощности торфяного покрова, глубина протаивания многолетнемерзлых пород возрастает при уменьшении толщины торфа.

По результатам нивелирования выявлены изменения многолетнемерзлых пород в двух временных интервалах. С 1984 г., в течение 15 лет наблюдался подъем высоты поверхности бугров пучения, эти изменения совпали с экстремально холодными периодами наблюдений. Подъем поверхности бугра пучения происходил скачкообразно и был зафиксирован в 1985, 1988, 1995, 1999 гг. [70].

В таблице 1 приведены значения изменения поверхности вершинной части одного из бугров пучения Надымского стационара. За нуль принята высота поверхности бугра в 1980 г.

Таблица 1

Год	Высота, см	Год	Высота, см
1984	-5	1997	55
1985	5	1998	55
1986	-5	1999	74
1987	10	2000	75
1988	18	2001	65
1989	18	2002	63
1990	18	2003	63
1991	20	2004	58
1992	22	2005	70
1993	28	2006	56
1994	35	2007	57
1995	45	2008	55
1996	55	2009	56

На рисунке 7 приведена динамика поверхности одного из бугров пучения Надымского стационара.

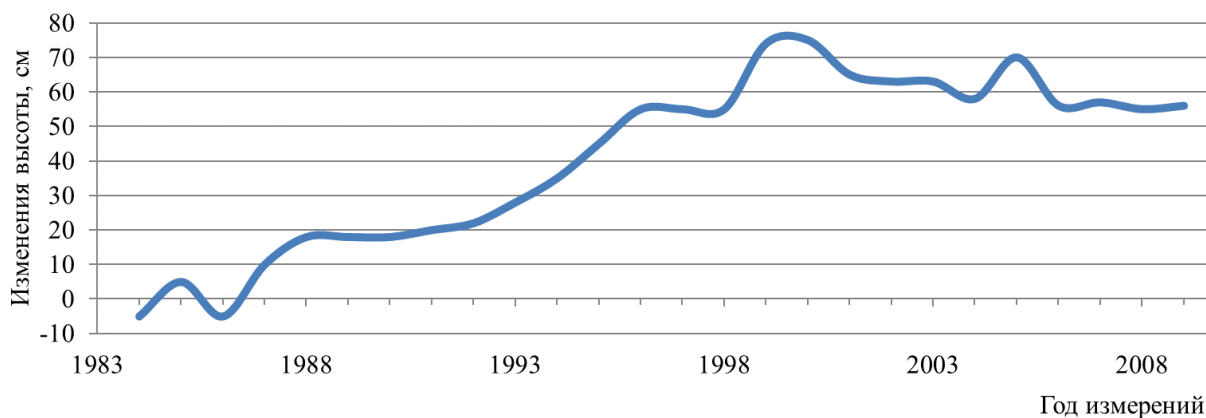


Рисунок 7 – Динамика поверхности вершинной части древнего бугра пучения

Второй временной период с 2000 г. показал общую тенденцию к осадке бугра пучения, несмотря на подъем зимой 2004–2005 гг., в течение которого наблюдались низкая температура воздуха и малое количество осадков [70].

Дальнейшие наблюдения после 2007 г. показали медленный подъем поверхности.

Результаты нивелирования за 2009–2011 гг. показали остановку изменения высоты бугров пучения, но при визуальном наблюдении выявлено увеличение их размеров в плане и прирост новых участков с буграми пучения.

Анализ проведенных исследований показывает, что в течение времени происходит постоянное изменение высоты бугров пучения (до 60 см), в зависимости от динамики торфонакопления, изменения климата, особенностей промерзания грунта и антропогенного воздействия [70].

По результатам многолетних исследований, проведенных Институтом криосферы Земли СО РАН, выявлено:

- отметки бугров год от года меняются. Центральная часть бугров растет, склоны остаются практически на той же высоте;

- многолетнему пучению подвержены разновозрастные (в том числе старые) бугры пучения и плоскобугристые торфяники. Следовательно, многолетнее пучение играет большую роль в формировании современного рельефа плоскобугристых торфяников;

- в результате потепления климата, начавшегося в 70-е гг. XX в., повышения температуры ММП и увеличения глубины оттаивания интенсивность подъема поверхности бугров и торфяников вследствие многолетнего пучения уменьшается. Особенно заметные изменения отмечаются в последние 10 лет;

- при общем снижении интенсивности пучения происходит значительный (до 30–40 см в год) подъем поверхности бугров в годы с холодными малоснежными зимами;

- значительный (до 30 см) подъем поверхности происходит даже в том случае, если низкие температуры воздуха и аномально маломощный снежный покров

наблюдаются всего один месяц. Таким образом, даже в случае потепления климата пучение будет оставаться активным процессом [5, 70].

Несмотря на большой объем выполненных работ и правильность подхода к решению задачи, необходимо отметить, что применение современных технологий и приборной базы, используемой в геодезическом производстве, позволят уменьшить трудозатраты и увеличить точность проводимых работ по мониторингу бугров пучения.

Выводы по первому разделу

В результате анализа отечественного и зарубежного опыта исследований бугров пучения выявлено следующее:

- несмотря на глобальное потепление климата в последние десятилетия активизировались мерзлотные процессы, что приводит к влиянию многолетнемерзлых форм рельефа на инженерные сооружения;

- основные нефтегазоконденсатные месторождения, разработанные ранее и разрабатываемые сегодня, находятся в зонах распространения многолетнемерзлых форм рельефа;

- анализ многолетних метеоданных показал, что климатические характеристики не оказывают существенного влияния на скорость процессов, протекающих при развитии или деградации бугров пучения;

- изменения форм бугров пучения происходят неравномерно и многолетнему пучению подвержены бугры пучения различного возраста;

- имеющиеся классификации бугров пучения не предусматривают геодезический пространственный мониторинг, так как технологии, позволяющие оперативно выполнять эти работы, появились в конце XX – начале XXI в.

Установлено что рост бугров пучения происходит при росте и падении температуры окружающей среды примерно с одинаковой вероятностью. Главное и существенное влияние на жизненный цикл бугров пучения оказывает

нарушение поверхностного слоя земной поверхности. Именно это и происходит при разработке нефтегазовых месторождений. Поэтому разработка методики геопространственного мониторинга многолетнемерзлых форм рельефа на основе инженерно-геодезических изысканий является актуальной научно-технической задачей.

2 АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

2.1 Распространение многолетнемерзлых форм рельефа в районе проведения работ

Основное количество перспективных нефтегазовых месторождений РФ территориально находятся в зонах распространения многолетнемерзлых пород.

В работе осуществлен анализ выполненных инженерных изысканий на Агапском лицензионном участке, Олимпийском лицензионном участке и Самбургском месторождении, местоположение участков приведено на рисунке 8.



Рисунок 8 – Карта распространения бугров пучения и месторасположения участков проведения работ

Из рисунка видно, что перспективные участки добычи нефти и газа находятся в районах расположения многолетних и сезонных бугров пучения.

На западносибирских газопроводах, функционирующих уже десятки лет, отмечаются участки со сформировавшимися вдоль них ледяными телами, которые сдвигают трубопроводы с проектного положения, несмотря на пригрузки. Такая ситуация наблюдается, например, на газопроводе Ямбург – Ныда, где участков с образовавшимися буграми насчитывается более 600 [5, 15, 70].

2.2 Влияние многолетнемерзлых форм рельефа на проектирование, строительство и эксплуатацию линейных сооружений

Образование бугров пучения, особенно однолетних, вызывает деформации и существенно осложняет строительство и эксплуатацию линейных сооружений (дорог, газо- и нефтепроводов), зданий, буровых вышек и др., особенно в условиях равнин, например при обустройстве нефтяных и газовых месторождений Северо-Западной Сибири. Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в пределах криолитозоны приводят к трансформации геокриологических процессов, развивающихся как в зонах непосредственного взаимодействия с ними, так и на прилегающих к ним территориях. Возникает сложное механическое и тепловое взаимодействие собственно трубопроводов с геологической и гидрогеологической средой на многолетнемерзлых грунтах и заболоченных территориях. Часто происходит нарушение динамического равновесия, сопровождающееся активизацией опасных природных процессов с их негативным влиянием на техническое состояние трубопроводов, нередко приводящим к аварийным ситуациям.

Особенно подвержены процессам пучения «теплые» газопроводы, в которых средняя температура газа более 0 °С.

Большинство линейных сооружений, проходящих на 70 % территории России, занятых криолитозонами, подвергаются морозному пучению [5, 15, 70].

В нормативных документах РФ, разработанных для изысканий, проектирования и строительства линейных сооружений в районах распространения вечной мерзлоты, предлагаются способы избежать воздействия негативных факторов морозного пучения грунтов на линейное сооружение. В п. 7.11 СП 36.13330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 2.05.06.-85) «Свод правил. Магистральные трубопроводы»: «При выборе трассы для подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах следует по возможности избегать участков с подземными льдами, наледями и буграми пучения, проявлениями термокарста, косогором с льдонасыщенными, глинистыми и переувлажненными пылеватými грунтами. Бугры пучения следует обходить с низовой стороны» [84].

В п. 2.10 ВСН 014–89 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов Охрана окружающей среды» сказано: «При инженерных изысканиях необходимо выделять участки, требующие выполнения интенсивных природоохранных мероприятий: бугры пучения, участки распространения жильных льдов, криопегов, полигональных почв; ...». Там же в п. 3.7: «При выборе трасс и площадок в зоне вечномерзлых грунтов под сооружения следует избегать участков с широким распространением бугров пучения, бугристых торфяников, с полигонально-жильными и пластовыми льдами, а также участков, вплотную прилегающих к существующим, даже задернованным оврагам, особенно к их верховьям» [16].

В п. 1.4 ВСН 61–89 «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты» сказано: «Для инженерной оценки мерзлотно-грунтовых и других природных условий, а также для прогноза их изменения в процессе инженерного и хозяйственного освоения территории требуются данные, характеризующие в пределах строительных площадок и отдельных участков трассы: климат; распространение и залегание вечномерзлых грунтов; вид, состав, сложение, строение и температурный режим грунтов; мощность деятельного слоя; физико-механические и теплофизические свойства грунтов в мерзлом и талом состояниях; наличие, режим и свойства грунтовых вод; мерзлотные процессы (мо-

розное пучение, бугры пучения, наледи, подземный лед, термокарст, солифлюкция, трещино-образование)». Там же в п. 2.12 сказано: «Следует избегать укладки трассы и размещения отдельных сооружений на участках с подземными льдами, распространением наледей и бугров пучения, с бессточными заболоченными понижениями местности на косогорных участках с льдонасыщенными глинистыми и переувлажненными пылеватыми грунтами. Мощные бугры пучения следует, как правило, обходить с низовой стороны» [18].

В п. 2.8 ВСН 84–89 «Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты» сказано: «При трассировании необходимо обходить участки с неблагоприятными мерзлотными и грунтово-гидрогеологическими условиями (близкое залегание подземных льдов; наледные участки; крупные бугры и гряды пучения; склоны, подверженные солифлюкции; участки с льдонасыщенными грунтами, термокарстом и многочисленными термокарстовыми озерами)». Согласно п. 3.8 ВСН 84–89: «Для участков с особо сложными мерзлотно-грунтовыми условиями (наличие термокарста, крупных включений подземного льда, бугров пучения, солифлюкции, наледей, подтопляемых речных пойм и термокарстовых озер) необходимо разрабатывать варианты индивидуального проектирования и на основе сопоставления их технико-экономических показателей выбирать оптимальные решения» [20].

В пункте 7.1.18 СТО Газпром 2-2.1-249–2008 «Магистральные газопроводы» сказано: «Выбор трассы на ММГ должен производиться на основе:

- мерзлотно-инженерно-геологических карт и карт ландшафтного микро-районирования оценки благоприятности освоения территорий масштаба не более 1 : 100 000;
- схематической прогнозной карты восстановления растительного покрова;
- карт относительной осадки грунтов при оттаивании;
- карт коэффициентов удорожания относительной стоимости освоения».

Там же в п. 7.1.19 сказано: «На участках трассы, где возможно развитие криогенных процессов, должны проводиться предварительные инженерные изыскания для прогноза этих процессов» [89].

В п. 7.1.20 сказано: «При выборе трассы на ММГ следует по возможности избегать участки с подземными льдами, наледями, буграми пучения, проявлениями термокарста, косоголов с льдонасыщенными глинистыми и переувлажненными пылеватыми грунтами. Бугры пучения следует проходить с низовой стороны» [89].

В работе Васильчук Ю. К. и Васильчук А. К. «Особенности инженерных изысканий для строительства трубопроводов в пределах бугристых ландшафтов зоны спорадического распространения многолетнемерзлых пород» [15] приводится сезонная динамика воздействия бугров пучения на трубопровод. По степени опасности воздействия на трубопроводы выпуклые бугры пучения можно разделить на две группы:

- формирующиеся при промерзании замкнутых таликов без подтока влаги;
- образующиеся в результате миграции влаги из водоносных горизонтов к фронту промерзания.

Если первые оказывают локальное воздействие на линейные объекты, то вторые вовлекают трубопровод в цепь взаимодействий с грунтовой средой на обширной территории, из которой происходит подток грунтовых вод. Последовательное протаивание бугров, подтягивающих воду из окружающих трубопровод бугристых массивов, приводит к подтоплению трассы трубопровода и формированию потока воды вдоль нее.

Зону спорадического распространения многолетнемерзлых пород отличает локальная встречаемость мерзлых бугристых ландшафтов, которые обычно обнаруживаются только при изысканиях протяженных линейных объектов [15].

В таблице 2 приведены значения проектного положения трубопровода и изменения в первые два года эксплуатации.

Таблица 2

Расстояние, км	Проектное положение, м	Зима первого года эксплуатации, м	Лето второго года эксплуатации, м	Зима второго года эксплуатации, м
0,60	2,10		2,50	2,10
0,70	2,00		2,50	0,70
0,80	1,50	1,00	1,80	1,00
0,90	1,60	1,10	1,10	0,75
1,00	2,10	0,60	0,90	0,50
1,10	1,90	2,50	1,30	2,90
1,20	1,90	1,85	1,50	1,00
1,30	1,80	1,60	1,70	1,10
1,40	1,70	1,40	1,90	1,40
1,50	1,60	1,25	2,10	1,70
1,60	1,50	1,05	2,30	1,90
1,70	1,40	0,90	2,50	2,20
1,80	1,35	0,75	2,70	2,50
1,90	1,50	0,70	2,90	2,50
2,00	2,00	0,90	2,00	2,50
2,10	1,80	0,80	2,35	2,50
2,20	2,00	0,85	2,70	2,30
2,30	2,50	0,95	3,00	2,00
2,40	1,70	1,00	1,00	1,70
2,50	1,60	1,80	1,25	1,50
2,60	1,50	1,00	1,50	1,20
2,70	1,40	1,30	1,50	1,00
2,80	2,00	1,15	3,50	1,50
2,90	2,50	1,10	4,30	4,50
3,00	2,60	1,05	3,60	4,30
3,10	3,30	1,20	1,50	1,30
3,20	3,00	1,10	1,30	1,20
3,30	2,60	1,05	1,20	1,10
3,40	2,30	0,95	1,10	0,95
3,50	2,00	0,85	0,95	0,80
3,60	1,60	0,80	0,80	0,70
3,70	2,10	0,60	1,20	0,55
3,80	2,00	0,50	1,50	1,50
3,90	1,60	1,30	1,50	1,60
4,00	1,50	1,05	1,70	1,50
4,10	1,90	1,20	2,10	2,50
4,20	1,80	1,50	2,20	2,30
4,30	2,20	1,00	1,90	1,00
4,40	2,00	0,80	1,60	1,00
4,50	1,85	1,00	1,55	
4,60	1,85	1,70	1,50	

На рисунках 9–11 показаны изменения вертикального положения газопровода в первые два года его эксплуатации.

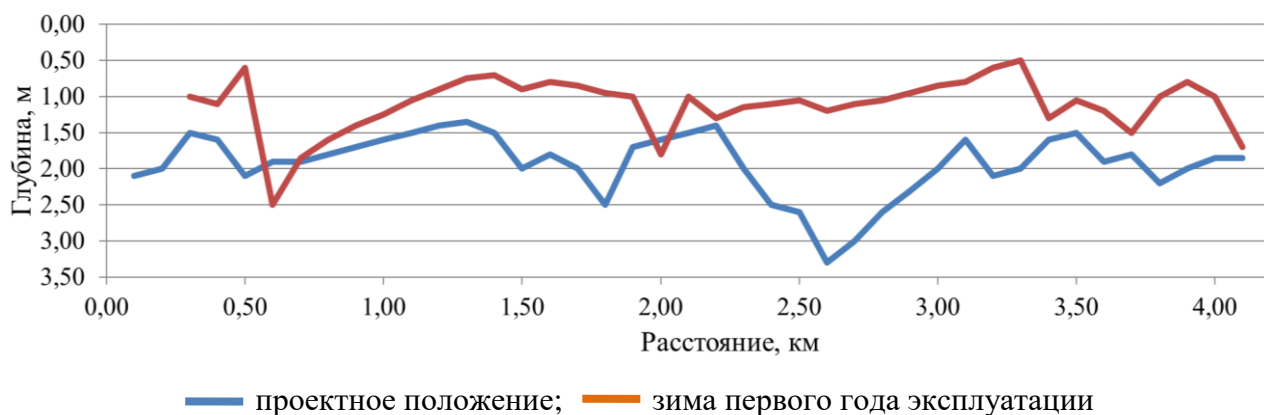


Рисунок 9 – Сезонная динамика деформаций трубопровода в течение зимы первого года (расположение бугров: 2-й километр, 3-й километр, 4-й километр)

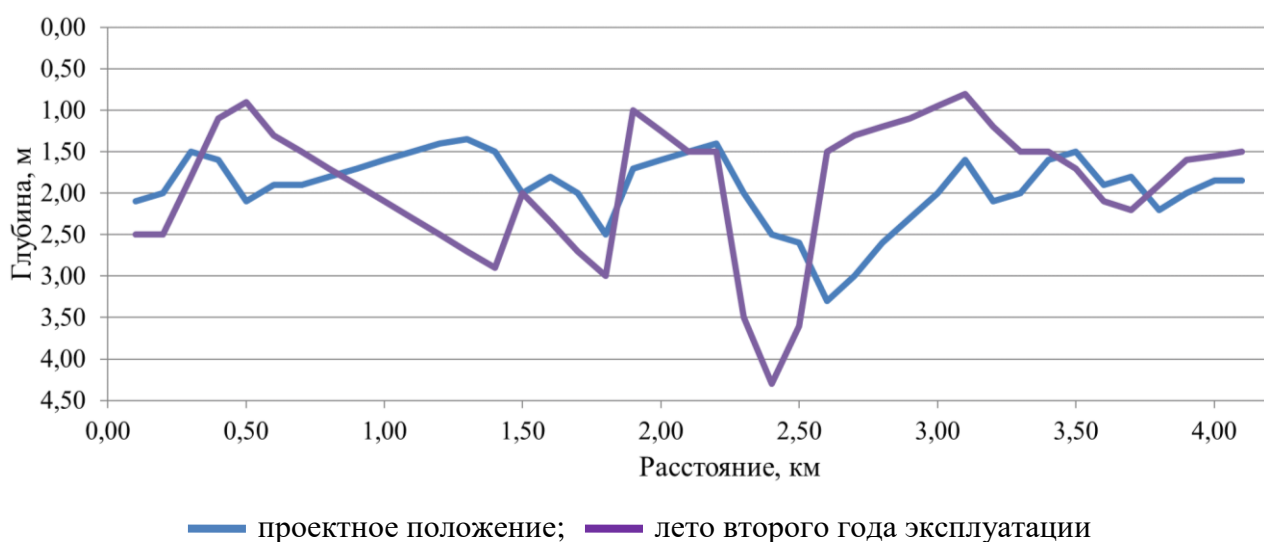


Рисунок 10 – Сезонная динамика деформаций трубопровода в течение лета второго года (расположение бугров: 2-й километр, 3-й километр, 4-й километр)

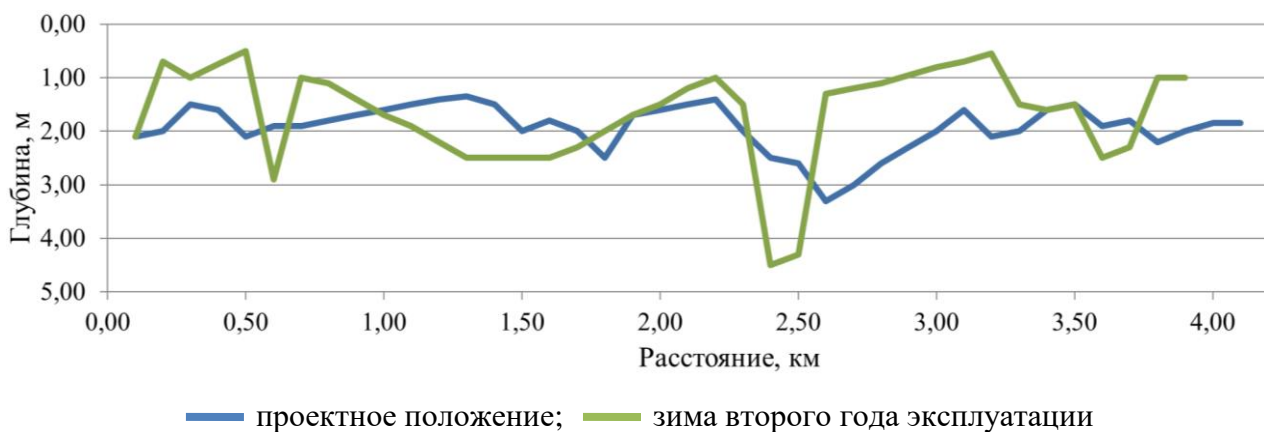


Рисунок 11 – Сезонная динамика деформаций трубопровода в течение зимы второго года (расположение бугров: 2-й километр, 3-й километр, 4-й километр)

Так, в пределах бугристого массива амплитуда сезонного перемещения трубопровода между летним и зимним сезонами составила 2,3 м, а максимальное отклонение от проектного положения – 1,45 м.

На торфянике амплитуда между положениями трубопровода в зимние сезоны первого и второго года эксплуатации составила 1,8 м, а отклонение от проектного положения – 2,2 м не только в вертикальном смещении.

На пересекающем бугристый массив отрезке положение трубопровода разнонаправленно изменяется от сезона к сезону, при этом летом здесь преимущественно наблюдается его всплывание примерно на 1,2 м [15].

Результаты взаимодействия трубопровода и бугристых ландшафтов сказались на его состоянии. Уже на третий год эксплуатации на его трассе появилось пять участков, приуроченных к бугристым массивам, с радиусом кривизны менее 200 м. Протяженность участков с опасным радиусом кривизны составила 23 и 34 м. Очевидно, что трубопровод подвергался особенно интенсивным воздействиям на границах между талыми и мерзлыми участками. Поэтому нередко в тех случаях, когда причиной аварии считается дефект трубы или коррозия металла, она в действительности может быть результатом неоднородности геокриологической среды, вызвавшей дополнительные сгибающие нагрузки на трубу [15]. Возникает необходимость 3D-моделирования и геопространственного мониторинга бугров пучения.

Согласно ПБ 07-269–98, допустимые и предельные показатели деформации земной поверхности для наружных трубопроводов должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 3 [8].

Таблица 3

Сеть и ее отличительный признак	Деформации, м		
	обозначения	допустимые	предельные
I. Газопроводы и нефтепроводы с избыточным давлением от 12 до 25 кг/см ² включительно, м			
а) наземные и надземные из стальных труб различных марок	[e]	$8 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$

К буграм пучения, особенно тундровым, необходимо относиться более внимательно.

В полевой сезон 2015 г. в ЯНАО работало восемь экспедиций по изучению тундровых бугров, которые в результате взрыва становятся гигантскими воронками.

Ученые Института проблем нефти и газа РАН обнаружили еще несколько бугров пучения в центральной части Ямбургского месторождения.

В связи с глобальным потеплением на этих территориях происходит вызванный процессами разложения газовых гидратов подземный взрыв смеси льда и газа, что и приводит к образованию бугров пучения [15, 70].

Высота бугра достигает десятков метров, а диаметр – 2 км.

Бурение скважин нередко приводит к выбросам газа, которое вызывает аварийную ситуацию.

Поэтому необходимо проводить комплексные исследования верхнего строения Земли в местах бурения скважин.

На газопроводе Надым – Пунга вдольтрассовое формирование бугров пучения также привело к нарушению пространственного положения трубопровода. В долине реки Пунга вблизи подножия бугра пучения, где проходит газопровод, в течение его эксплуатации образовалась чаша оттаивания глубиной около 6 м, рисунок 12 [15].

Основной причиной изменения проектного положения оси магистрального газопровода в виде выпучивания, по литературным источникам, является процесс морозного пучения.

В работе Биндера И. О., основанной на производственных материалах, при выполнении инженерных изысканий на Сергинском, Сугмутском, Северо-Саренбойском и других нефтегазовых месторождениях, приводятся примеры ситуаций, которые свидетельствуют о необходимости организации комплексного геодезического пространственного мониторинга не только за эксплуатируемыми инженерными сооружениями, но и за прилегающими к месторождениям территориями [6].



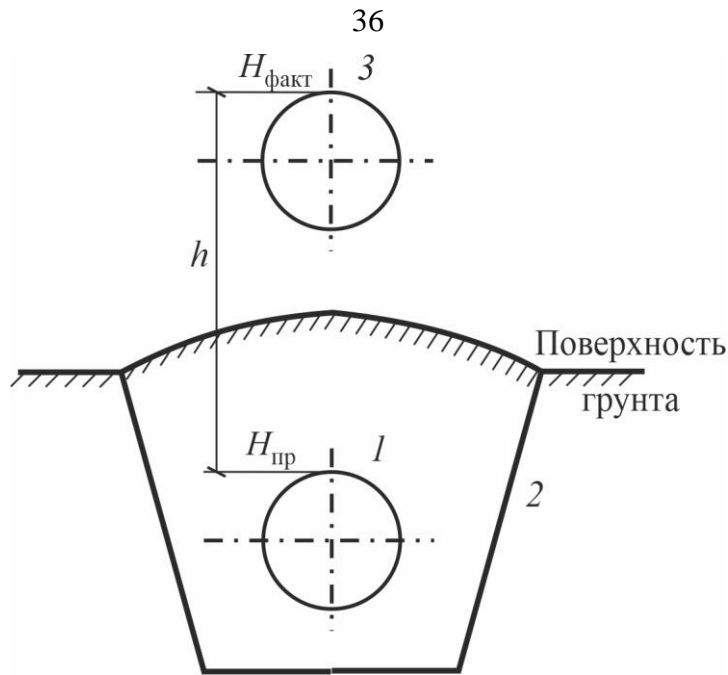
Рисунок 12 – Трубопровод в зоне влияния бугра пучения [15]

Производственный опыт инженерных изысканий и геодезический деформационный мониторинг изменения проектного положения оси магистрального газопровода позволяют сделать предположения о трех главных причинах недопустимых деформаций:

- деформации, обусловленные процессом морозного пучения;
- сезонное протаивание (глобального потепления);
- неблагоприятное воздействие миграционных бугров пучения.

Характер влияния последних еще недостаточно изучен, и методику геопро странственного мониторинга подземной и наземной составляющих бугров пучения необходимо разрабатывать и внедрять в производство инженерных изысканий и эксплуатацию объектов нефтегазового комплекса.

Математические модели, которые положены в основу типовых расчетов на устойчивость магистральных газопроводов при сооружении и ремонте, разрабатывались, исходя из классического геопро странственного положения трубопровода относительно поверхности многолетнемерзлых грунтов. В качестве примера можно рассмотреть рисунок 13 [12].



1 – проектное положение газопровода; 2 – строительная траншея;
3 – фактическое положение газопровода

Рисунок 13 – «Классические» модели морозного пучения

В этом случае для определения глубины протаивания институтом «Гипроспецгаз» предложена следующая формула:

$$h_{\text{п}} = \alpha\beta \left\{ \sqrt{\frac{2\lambda_{\text{oc}} t_{\text{тр}} \left[\tau - \frac{H_c^2 (q_o + 0,5C_c t_{\text{тр}})}{2\alpha^2 \beta_c^2 t_{\text{тр}}} \right]}{q_o + 0,5C_{\text{oc}} t_{\text{тр}}}} + \left(\frac{H_c \lambda_{\text{oc}}}{\lambda_c} \right)^2 - \frac{H_c \lambda_{\text{oc}}}{\lambda_c} \right\}, \quad (1)$$

где α – коэффициент зависимости глубины протаивания от диаметра трубы;

β – коэффициент перехода от условий одномерной к условиям двухмерной задачи;

$t_{\text{тр}}$ – температура стенки трубы, °С;

τ – время, в течение которого трубопровод имеет положительную температуру, ч;

H_c – толщина теплоизолирующего слоя в основании насыпи, м;

q_0 – количество тепла, необходимое для оттаивания 1 м³ грунта, Дж/м³;

C_c – объемная теплоемкость теплоизолирующего слоя, Дж/(м³ · град);

λ_c – коэффициент теплопроводности теплоизолирующего слоя, ккал/(м · ч · град);

λ_{oc} – коэффициент теплопроводности грунта при оттаивании слоя, ккал/(м · ч · град);

C_{oc} – объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м³ · град).

Для прогноза глубины протаивания грунта под трубопроводом используется формула Форхгеймера [12]:

$$h_0 = \frac{a(1+b)}{1-b}, \quad (2)$$

$$a = \sqrt{h_0^2 - \frac{D_n^2}{4}}, \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\exp\left(\frac{2t_{гр} \ln \frac{4h_0}{D_n}}{\frac{\lambda_T}{\lambda_M} t_{тр} - t_{гр}}\right)}, \quad (4)$$

где h_0 – расстояние от поверхности фунта до центра трубы;

D_n – наружный диаметр трубы;

$t_{гр}$ – температура мерзлого фунта;

$t_{тр}$ – температура стенки трубы;

λ_M, λ_T – коэффициенты теплопроводности соответственно мерзлого и талого фунтов;

a – температура по длине трубопровода летом;

b – температура по длине трубопровода зимой.

В типовых расчетах при сооружении и ремонте газонефтепроводов, справедливо предлагают формулу дополнить учетом сезонного протаивания $h_{сп}$, которая может быть предвычислена по формуле [12]:

$$h_{сп} = kH_{сп} - H_o, \quad (5)$$

где $H_{сп}$ – нормативная глубина сезонного протаивания;

H_o – высота откосов;

k – коэффициент, учитывающий приток тепла через откосы,

$$k = \sqrt{\frac{L}{L_1}}, \quad (6)$$

где L – длина поверхности насыпи (выемки);

L_1 – длина основания насыпи (выемки).

В настоящее время при строительстве трубопроводов все чаще встречаются ситуации, представленные на рисунке 14.

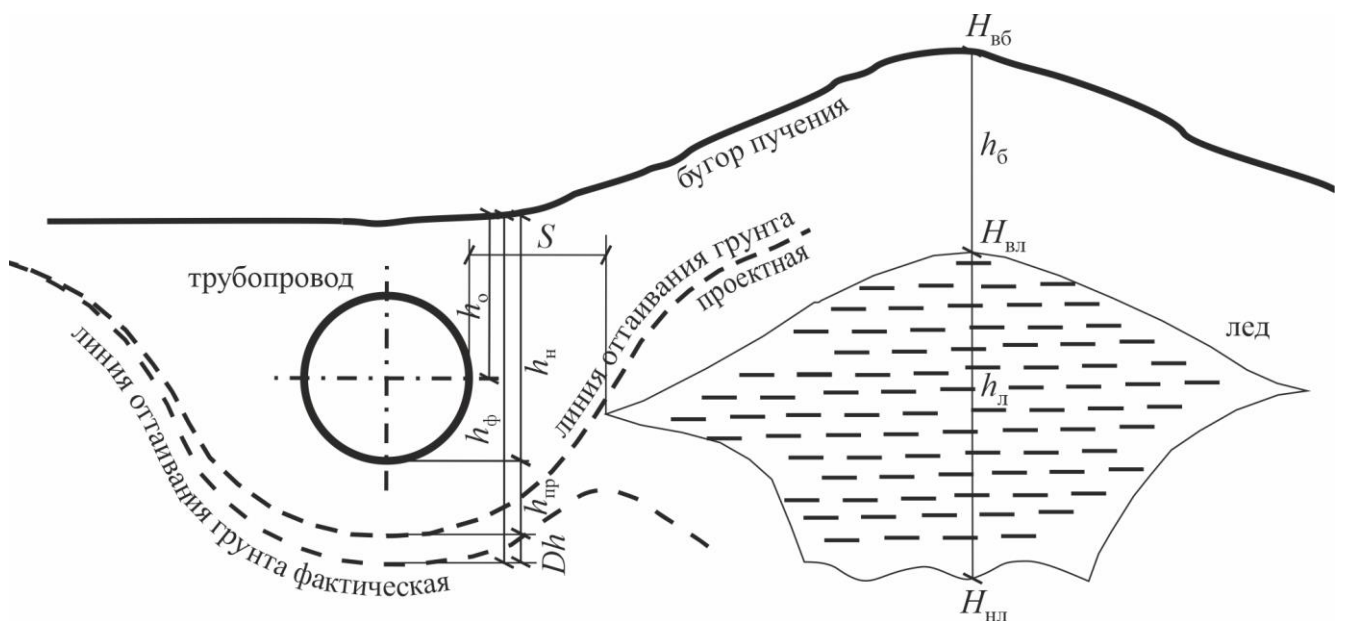


Рисунок 14 – Расположение трубопровода вблизи бугра пучения

В этом случае при прогнозировании деформаций геопространственного положения трубопровода необходимо учитывать «боковое» воздействие бугра пучения, которое происходит от наземной и подземной его составляющих. Общая величина протаивания может быть определена с учетом следующих величин:

$$h_{\text{оп}} = h_{\text{п}} + h_{\text{сп}} + h_{\text{мбп}}, \quad (7)$$

где $h_{\text{п}}$ – глубина протаивания грунта под трубопроводом;

$h_{\text{сп}}$ – величина сезонного протаивания;

$h_{\text{мбп}}$ – величина влияния многолетнего бугра пучения,

$$h_{\text{мбп}} = h_{\text{л}} + h_{\text{з}}, \quad (8)$$

где $h_{\text{л}}$ – величина влияния бугра пучения в летний период;

$h_{\text{з}}$ – величина влияния бугра пучения в зимний период.

На основе анализа производственного опыта в выполнении комплекса инженерных изысканий и мониторинга деформационных процессов разработана классификация деформаций магистральных трубопроводов для целей геодезического мониторинга, представленная на рисунке 15.

При выполнении инженерных изысканий для обустройства нефтегазовых месторождений следует особое внимание уделять определению границ наземной и подземной составляющих миграционных бугров пучения с ядром из многолетнемерзлых пород.

Анализ производственных материалов и результаты научных исследований показывают острую необходимость проведения геопространственного мониторинга многолетнемерзлых форм рельефа, одной из составляющей которых являются инженерно-геодезические изыскания.



Рисунок 15 – Классификация деформаций магистральных трубопроводов для целей геодезического мониторинга

2.3 Геопространственный мониторинг инженерных сооружений на нефтегазовых месторождениях Крайнего Севера

2.3.1 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Бованенковском месторождении

Бованенковское месторождение по запасам газа является одним из крупнейших в мире. Его эксплуатация началась в 2012 г. с пуском первой установки комплексной подготовки газа. В течение ближайших лет планируется запустить в эксплуатацию три газовых промысла, работу которых должны обеспечивать четыре установки комплексной подготовки газа, двенадцать дожимных комплексных станций с общим количеством скважин более 700 штук. Жизнедеятельность

любого месторождения зависит от многочисленных производственных, инфраструктурных и вспомогательных инженерных сооружений, успешная эксплуатация которых невозможна без хорошо развитой дорожной сети, внутрипромысловых и подъездных автодорог для доставки технологического оборудования, обслуживающего персонала и т. п. [59].

Подъездные дороги на промышленных предприятиях на севере Западной Сибири это, как правило, автомобильные дороги, соединяющие предприятия с дорогами общего пользования, с другими промышленными объектами, железнодорожными станциями, речными портами, аэродромами. Они рассчитаны на пропуск автотранспортных средств, допускаемых для обращения на дорогах общего пользования.

Основным нормативно-техническим документом при разработке проектов строительства и реконструкции автомобильных дорог являются строительные нормы и правила (СНиП). Для того чтобы инженеры-геодезисты могли использовать новое современное оборудование и приборы, в настоящее время выпускают актуализированные СНиП. Следует отметить, что и эти нормативные документы не могут в полном объеме учесть целый ряд особенностей природного и техногенного характера, которые оказывают существенное влияние на методику геодезического обеспечения строительства автомобильных дорог в районах Крайнего Севера.

Геодезическое обеспечение строительных работ на таких объектах можно условно разделить на три основных этапа: отсыпку, вынос высотных отметок и проектных осей на каждый слой дорожного полотна. Допуски составляют 5 и 10 см на протяжении не более 10 % от всей длины дороги в высотном отношении и 25 см в плановом положении. Уплотнение грунтов рекомендуется выполнять по слоям одновременно с отсыпкой или сразу после нее. При этом геодезисты контролируют толщину каждого слоя, которая составляет от 0,3 до 0,5 м. Процесс уплотнения осуществляется с применением мощной строительной техники по так называемым «захваткам» [59]. Размер захватки L регламентируется нормативной литера-

турой. Ее величина указывается в проекте производства работ. Как правило, она равна 100–300 м и может быть вычислена по формуле

$$L = \Pi t_0 / 2ThB, \quad (9)$$

где Π – производительность звена грунтоуплотняющих машин, м³/ч;

t_0 – время сохранения оптимальной влажности, с;

T – продолжительность смены, ч;

h – высота слоя укатки, м;

B – ширина слоя укатки, м.

Уплотнение грунта осуществляется по всей ширине насыпи с обеспечением перекрытия следа предыдущей проходки на 20–30 см.

Вынос оси проектируемой трассы подъездной автомобильной дороги на Бованенковском месторождении производился электронными тахеометрами со стоянок теодолитных ходов и пунктов опорной геодезической сети. Контроль угловых и линейных измерений выполнялся электронными тахеометрами Sokkia. Техническое нивелирование выполнено электронным нивелиром Sokkia. Высотные отметки базисных точек, реперов, стоянок теодолитных ходов определены техническим нивелированием, допустимая невязка определялась по формуле [59]

$$f_{h\text{доп}} = \pm 30 \text{ мм} \sqrt{L}, \quad (10)$$

где L – длина хода, км.

Полученные невязки были в пределах допусков: минимальная – 5 мм, максимальная – 26 мм.

По разным причинам (глобальное потепление, аномальные перепады сезонных температур) в районе Бованенковского месторождения наблюдаются обвалы почвы, в том числе в непосредственной близости от районов строительства.

В качестве примера последствий развития бугра пучения можно привести воронку, образовавшуюся в 3,5 км от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, рисунок 16.



Рисунок 16 – Воронка в районе Бованенковского месторождения

Безусловно, такие обстоятельства свидетельствуют о необходимости организации комплексного геодезического пространственного мониторинга не только за эксплуатируемыми инженерными сооружениями, но и за прилегающими к месторождению территориями.

Можно предположить, что геометрические изменения на поверхности Земли различной степени интенсивности в разных направлениях и амплитудах в районе месторождения происходят постоянно. Подтверждением этому могут служить изменения в дорожном покрытии подъездных автомобильных дорог к кустовым площадкам. Дорожная одежда представляет собой «конструкцию» из набора железобетонных плит. Их пространственное положение постоянно изменяется, поэтому необходимо определять причину таких изменений [59].

Геодезический мониторинг совместно с другими видами мониторинга (геологическим, гидрологическим, температурным, экологическим и т. п.) позволяет установить характер и причинно-следственные взаимосвязи техногенных процес-

сов. При этом особенно важно исследовать природу происходящих событий и определить, отчего происходят деформации железобетонных плит, составляющих основу дорожной одежды. На рисунке 17 представлен фрагмент дорожной одежды из железобетонных плит типа ПДН («плита дорожная напряженная») [59].



Рисунок 17 – Фрагмент подъездной дороги на Бованенковском месторождении

Деформации плит могут быть обусловлены воздействием автомобильного транспорта, сезонным подтаиванием грунтов (локальный характер), а также более глобальными причинами (мировое изменение климата, техногенные изменения, происходящие на всей территории месторождения и за его пределами). Деформации вызывают неплотное прилегание плит к цементно-песчаной смеси, в результате чего происходит размыв земляного полотна и как следствие – сокращение срока эксплуатации дорожной одежды и необходимость проведения ремонта [59].

Для учета всевозможных деформационных процессов, обнаружения карстовых провалов, прогнозирования поведения земной поверхности, а также для обес-

печения успешной эксплуатации инженерных сооружений и месторождений нефти и газа в районах Западной Сибири, Крайнего Севера необходимо осуществлять геодезический пространственный мониторинг с применением новейших технологий, воздушного и наземного лазерного сканирования, георадаров, беспилотных летательных аппаратов с обязательным сопровождением ГНСС для оценки устойчивости насыпных линейных сооружений и выявления разрушений поверхности земли и обнаружения провалов почвы на территории нефтегазовых месторождений и за их пределами [59].

2.3.2 Оценка устойчивости насыпных инженерных сооружений при геопространственном мониторинге на нефтегазовых месторождениях

Зависимость деформаций от напряжений наиболее достоверным образом может быть учтена с помощью моделей упругопластического деформирования. Привлечение для расчетов напряженно-деформированного состояния сложных математических моделей теории пластического течения для идеальной пластичности, пластичности с упрочнением при ассоциированном и неассоциированном законах течения позволяет учитывать важнейшие особенности поведения грунтов под нагрузкой: нелинейность и необратимость деформаций, свойство изменять объем при сдвиге (эффект дилатансии), зависимость деформаций от пути нагружения и т. д. [66].

Благодаря развитию в последние десятилетия математического аппарата теории численного моделирования, программной реализации, в настоящее время расширяется область применения таких численных методов, как метод конечных элементов (МКЭ), который является одним из наиболее эффективных методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в различных задачах механики деформируемого твердого тела и горных пород, в частности [62].

Фундаментальный принцип МКЭ заключается в разбиении изучаемой области на элементарные области конечных размеров – конечные элементы (ри-

сунок 18). В каждом таком элементе неизвестная функция аппроксимируется полиномом, степень которого меняется в зависимости от поставленной задачи, но остается обычно невысокой (от 1 до 6). Для каждого элемента аппроксимирующий полином определяется его коэффициентами. Коэффициенты могут быть определены значениями функции в частных точках, называемых узлами элемента [66].

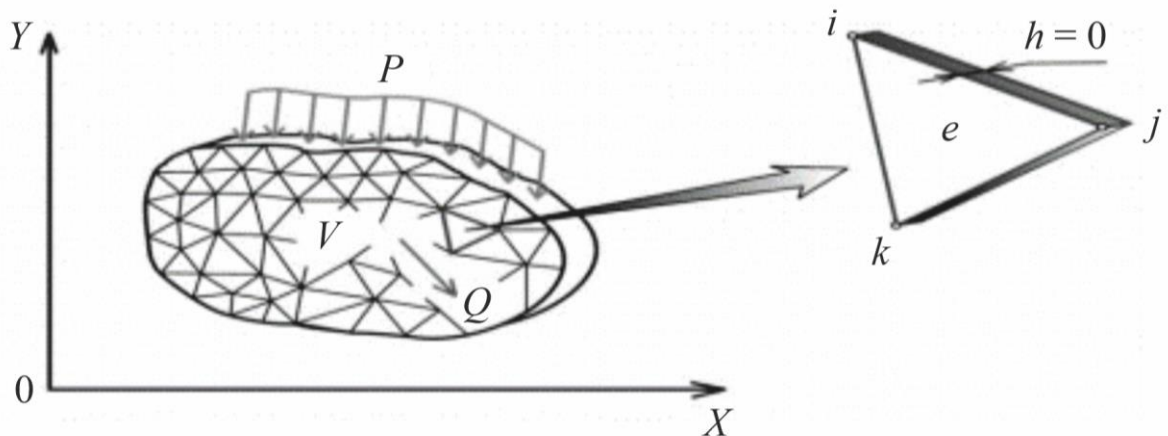


Рисунок 18 – Конечно-элементное представление изучаемой области

Решение статических задач линейной теории упругости (деформируемости) производится на основе численного решения уравнений линейной теории упругости МКЭ [66].

В настоящее время для моделирования устойчивости естественных и техногенных откосов широко используются разнообразные программные продукты с интегрированными модулями, позволяющими выполнять расчеты методами конечных элементов.

Результатом расчетов является коэффициент уменьшения напряжения или коэффициент безопасности ($K_{без}$), эквивалентный коэффициенту запаса устойчивости (K_3), при котором начинают появляться деформации откоса.

Моделирование по этому методу осуществляется итерационным способом, с нахождением на каждом этапе коэффициента запаса устойчивости (K_3). На по-

следующем шаге производится снижение прочностных свойств, путем увеличения (K_3), в соответствии со следующими зависимостями. Расчеты выполняются до тех пор, пока не произойдет деформирование откоса. Данный метод достаточно прост и дает возможность достоверно определять и проследивать этапы возникновения критических деформаций в откосах [66].

Одним из факторов, сдерживающих практическое применение методов МКЭ, является необходимость использования в расчетах дополнительных исходных параметров упругости отвальных масс (модель Мора – Кулона) – модуля Юнга (E), коэффициента Пуассона (ν) и угла дилатансии (ψ), что характерно для железно-дорожных насыпей, сложенных из разнородных грунтов.

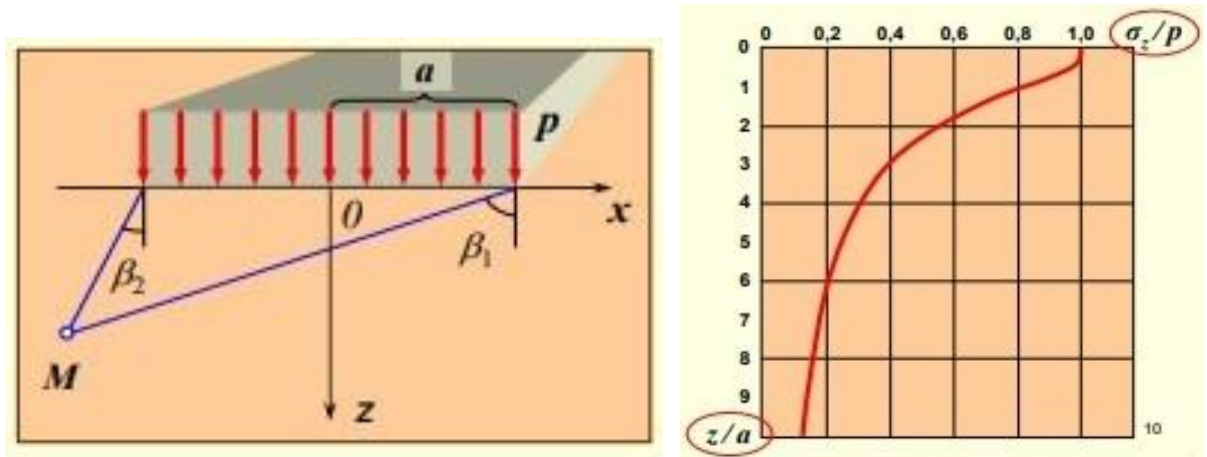
Исследование напряженно-деформируемого состояния двухслойной железно-дорожной насыпи методом конечных элементов. Совершенствованию конструкции железно-дорожного земляного полотна посвящены труды многих специалистов. Однако методы расчета и устройства двухслойных и многослойных железно-дорожных насыпей из разнородных грунтов до последнего времени были изучены недостаточно [66].

При проектировании земляного полотна в традиционных расчетах нормальных, касательных и главных напряжений условно принимается, что грунты под воздействием временной поездной нагрузки работают в упругой стадии. При этом в расчетах не учитывается разнородность слагающих насыпь грунтов. В математических моделях насыпей они принимаются изотропными.

Внешние нагрузки на земляное полотно и его основание на расчетной схеме традиционно принято представлять в виде совокупности отдельных полосовых нагрузок прямоугольной и треугольной форм, приложенных к полупространству (верху земляного полотна).

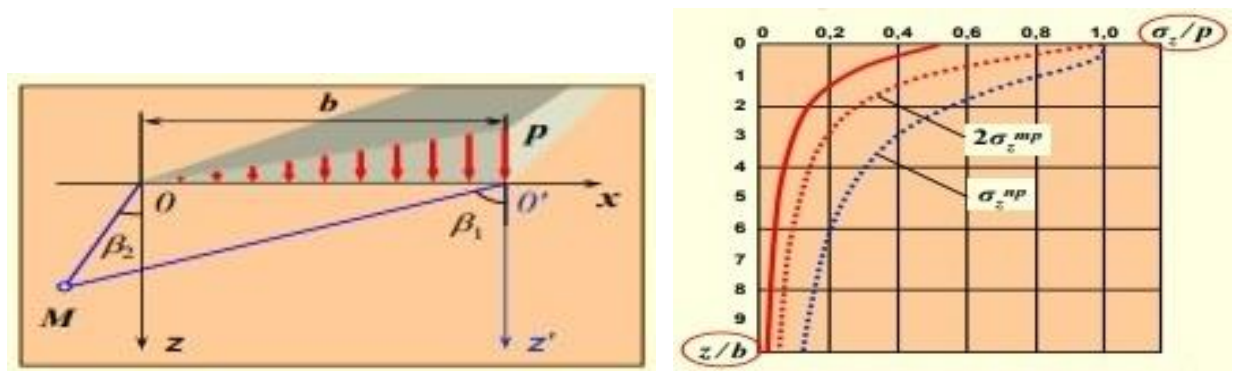
Такие расчетные схемы и допущения не соответствуют фактической нагрузке земляного полотна от подвижного состава. Верх земляного полотна фактически воспринимает нагрузку от балластной призмы, воспринимающей давление подошвы шпалы. За торцами шпал верх земляного полотна не нагружен вертикаль-

ной поездной нагрузкой. Поэтому в теле земляного полотна можно выделить среднюю нагруженную часть и ненагруженную часть вблизи откосов насыпи (рисунки 19, 20) [66], которые имеют различные по величине вертикальные деформации.



Изменение напряжений $\sigma_z^{\text{пр}}$ с глубиной вдоль оси OZ

Рисунок 19 – Напряжения в упругом полупространстве от прямоугольной полосовой нагрузки [66]



Изменение напряжений $\sigma_z^{\text{тр}}$ с глубиной вдоль оси OZ

Рисунок 20 – Напряжения в упругом полупространстве от треугольной полосовой нагрузки

Напряжения в упругом полупространстве от прямоугольной полосовой нагрузки вычисляются по формуле

$$\sigma_z^{\text{пр}} = -\frac{P}{\pi} \left(\beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 + \beta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right). \quad (11)$$

Напряжения в упругом полупространстве от и треугольной полосовой нагрузки вычисляются по формуле [66]

$$\sigma_z^{\text{тр}} = -\frac{P}{\pi} \cdot \frac{z}{b} \left[(\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) - \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \left(\beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 + \beta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right) \right]. \quad (12)$$

В традиционных расчетах земляного полотна не учитывается и конструкция верхнего строения пути (тип рельса, шпалы, размеры балластной призмы) и форма самого земляного полотна (ширина основной площадки, крутизна откосов, наличие берм и др.), характеристики которых существенно влияют на распределение поездной нагрузки на верх земляного полотна и в теле земляного полотна. Осадки насыпи и осадки ее основания рассматриваются как одномерные, хотя на самом деле деформации изменяются и по длине пути и по высоте насыпи, то есть являются объемными. Так, при расчетах осадки насыпей и их оснований грунт считается упруго деформируемым. При расчетах же местной и полной устойчивости насыпи считается, что грунт является абсолютно жестким. Классические методы расчета позволяют решать задачи лишь при значительной их идеализации, заменяя реальное сооружение его расчетной схемой. Внедрение вычислительных систем в инженерную практику позволяет, используя численные методы, производить расчеты практически любого сложного сооружения, разбивая его на конечные элементы [66].

Во многих технических расчетах упругие свойства веществ характеризуются модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ , полностью описывают упругие

свойства изотропного вещества с линейной упругостью, именно они используются при конечно-элементных расчетах технических конструкций. Для задач с нелинейными характеристиками упругости величины E и μ могут вводиться в качестве функций, зависящих от локальных значений тензора деформаций ε_{jk} . Модуль упругости Юнга E имеет размерность давления, а коэффициент Пуассона μ является безразмерной величиной. Деформированное состояние твердого тела описывается уравнением, связывающим тензор напряжений $\hat{\sigma}$ с «внешними» силами \vec{f} , действующими на тело и ускорением его отдельных точек [66]

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} + \vec{f} = \rho \vec{a}. \quad (13)$$

На рисунке 21 приведены расчеты напряженно-деформированного состояния двухслойной насыпи высотой 12 м на прочном основании, верхние 6 м насыпи представлены прочным грунтом, а нижние 6 м – более слабым.

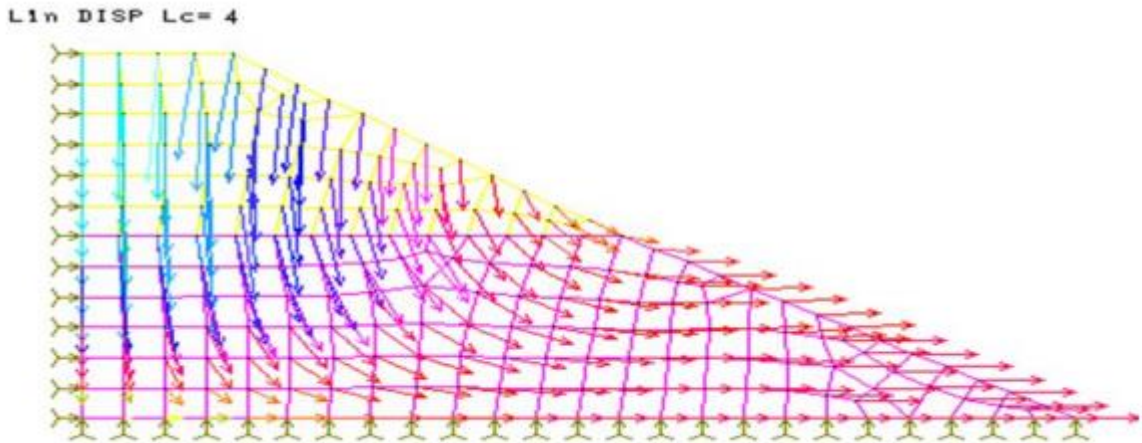


Рисунок 21 – Векторный график деформаций насыпи высотой 12 м на прочном основании

Из рисунка 21 следует, что слой нижнего грунта деформируется с растеканием [66]. Выполненные расчеты показали, нижний – менее прочный слой грунта

имеет характерные деформации расползания насыпи (это показано на векторном графике перемещения грунта под нагрузкой), рисунок 22.

На рисунке 22 приведены модели напряженно деформированного состояния этих насыпей и графики распределения деформаций.

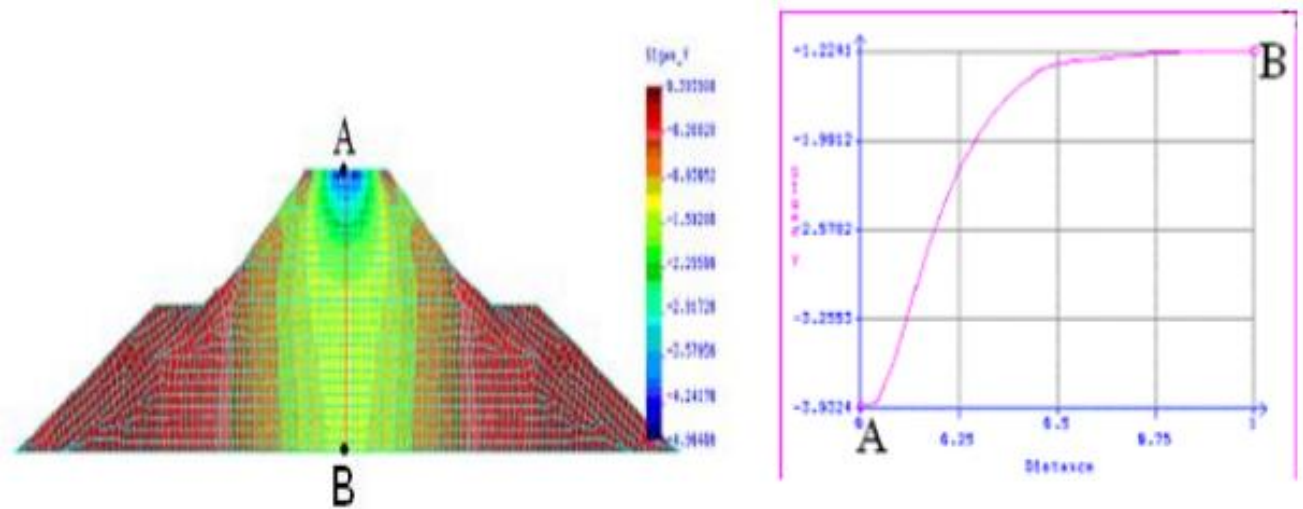


Рисунок 22 – Распределение вертикальных напряжений в грунте насыпи от поездной нагрузки при устройстве берм

Линия А-В – вертикаль по оси. В результате численных расчетов двухслойной железнодорожной насыпи получены решения для трех случаев: упругое решение; нелинейное решение; с учетом ползучести грунта насыпи. Рекомендуется использовать для расчетов напряженно-деформированного состояния слоистой насыпи разработанную нами конечно-элементную виртуальную модель пути, включающую верхнее строение и земляное полотно [66].

Для оценки возможной пластической деформации менее прочного слоя грунта насыпи («расползания насыпи») рекомендуется строить векторный график перемещения грунта насыпи под поездной нагрузкой. Если касательные напряжения от нагрузки превысят допустимые напряжения грунта, линии перемещения частиц грунта будут заметно отклоняться от вертикали, и это является указанием необходимости усиления слоистой насыпи. Для всесторонней оценки устойчивости

насыпных линейных сооружений необходимо проводить геодезический мониторинг совместно с другими видами мониторинга.

2.3.3 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Самбургском месторождении

Основу методов геопространственного мониторинга бугров пучения в районах Крайнего Севера составляют ГНСС-технологии. С помощью последних на территории нефтегазовых месторождений, для обустройства которых выполняют инженерные изыскания, создаются опорные геодезические сети. На предварительном этапе тщательно подбираются и изучаются материалы инженерных изысканий прошлых лет. Все методические решения принимаются с учетом имеющихся многолетних метеоданных.

На Самбургском месторождении планово-высотное обоснование на район проводимых работ развито от реперов геодинимического полигона [63].

От геодинимического полигона методом построения сети с использованием спутниковых приемников созданы пункты сгущения планово-высотной опорной сети на долговременных реперах.

Предельные погрешности положения пунктов планового съемочного обоснования, относительно пунктов государственной геодезической сети не превышают 0,3 мм в масштабе плана [63].

Фрагмент опорной геодезической сети для обустройства Самбургского месторождения нефти и газа показан на рисунке 23.

Специфической особенностью Самбургского месторождения являются территории распространения ММГ – их преимущественно островной и редкоостровной в пределах пойм и низких террас, массивно-островной характер в пределах высоких геоморфологических уровней. К болотным массивам приурочиваются участки грунтов в многолетнемерзлом состоянии [63].

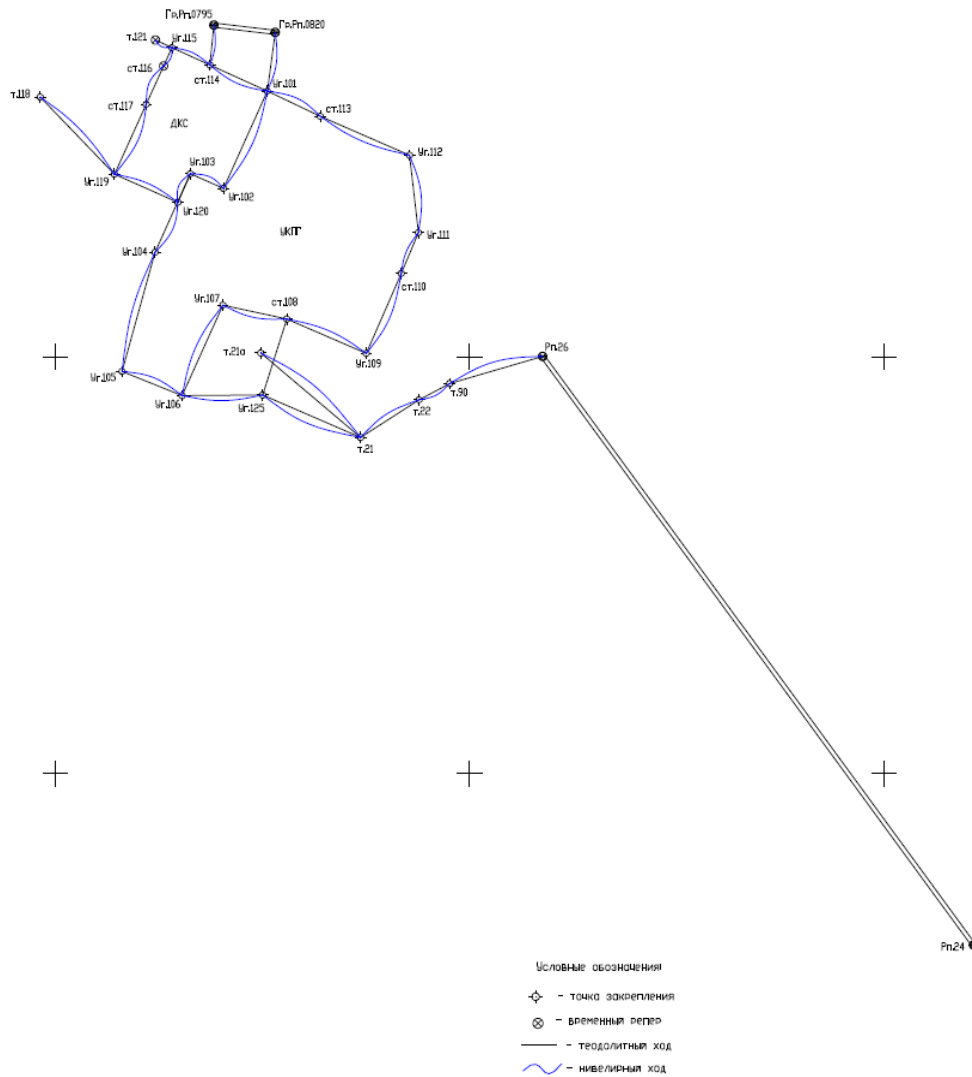


Рисунок 23 – Геодезическое обоснование на Самбургском месторождении

Характерная черта криологических условий – небольшие участки, морфологически выраженные в виде плоскобугристого торфяника (незаконмерное чередование мерзлых бугров разнообразной формы и размеров с тальми мочажинами).

Из современных геологических процессов и явлений следует отметить морозное пучение, заболачивание суходолов, сезонное промерзание-оттаивание.

Территория проведения изысканий располагается на участке с заглубленной кровлей многолетнемерзлых грунтов. Кровля многолетнемерзлых грунтов располагается на глубинах 2,0–12,5 м.

Среднегодовые температуры многолетнемерзлых пород на глубинах 7–10 м изменяются от минус 0,3 до минус 1,9 °С [63].

Для определения расположения многолетнемерзлых грунтов выполняются инженерно-геологические изыскания. План расположения геовыработок показан на рисунке 24.

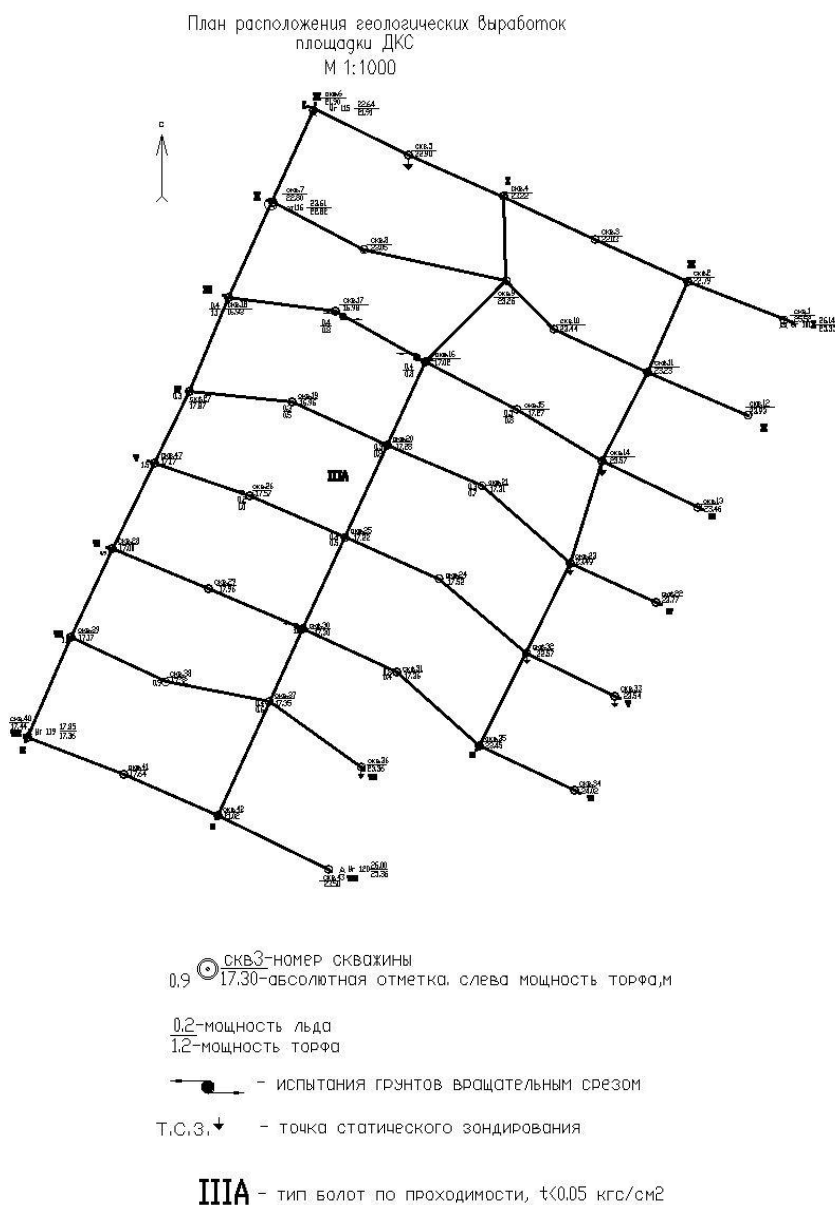


Рисунок 24 – План расположения геовыработок
на Самбургском месторождении [63]

Гидрогеологические условия рассматриваемой территории во многом обусловлены существующими мерзлотными факторами.

2.3.4 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Олимпийском лицензионном участке

Планово-высотное съемочное обоснование создано при помощи спутникового оборудования (двухчастотных приемников) от пунктов триангуляции Камъеган, Озеро, Мярехя, Паннэрто, Чернядьто, Веникуто [64].

Наблюдения проводились в два этапа:

- определение базовых станций от шести пунктов триангуляции 2–3-го классов;
- закладка и определение координат временных реперов вр.рп.1036, вр.рп.1037, ств. 207, ств. 2000 от базовых станций.

Плановое и высотное положение базовых станций, а далее временных реперов определены на основе использования геодезической спутниковой аппаратуры статическим методом измерений. Методика определения координат и высот принята, исходя из требований к точности измерений и указаний фирмы-изготовителя прибора и в соответствии с требованиями «Инструкции по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» (ГКИНП (ОНТА)-02-262–02): время наблюдения спутников не менее 40 минут, количество наблюдаемых спутников не менее четырех, геометрический фактор PDOP ≤ 5 , маска возвышения над горизонтом 15° , дискретность измерений 5 секунд [24]. Средние погрешности положения точек съемочной геодезической сети относительно пунктов опорной геодезической сети не превышают 0,2 мм в масштабе плана, отметки высот точек съемочной геодезической сети определены с точностью до 0,05 м [64].

Опорная геодезическая сеть для обустройства Олимпийского лицензионного участка показана на рисунке 25.

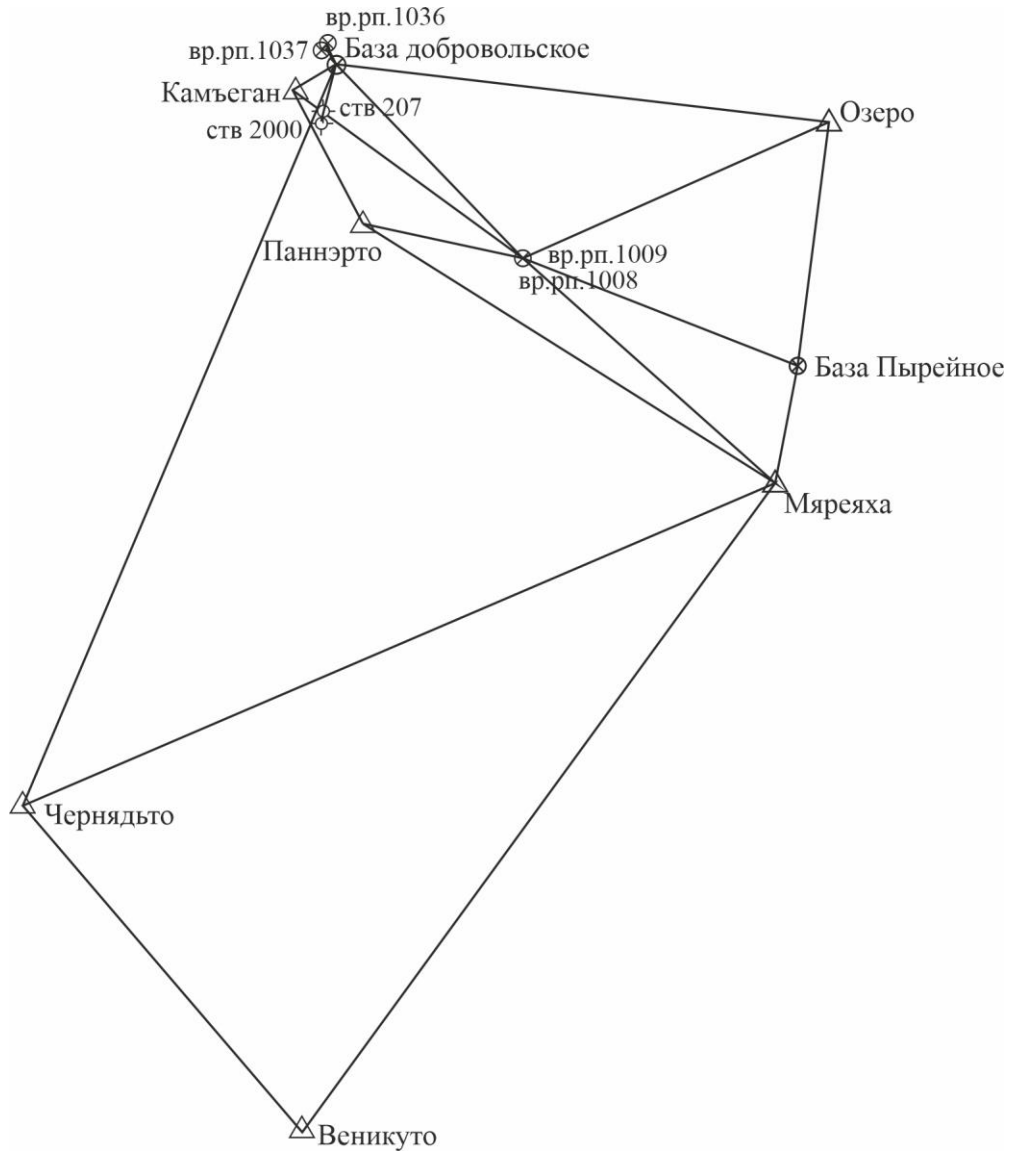


Рисунок 25 – Геодезическое обоснование на Олимпийском лицензионном участке [64]

Непосредственно съемочное обоснование выполнено путем проложения отдельных теодолитных ходов с узловыми точками и ходов технического нивелирования. Техническое нивелирование выполнено по пунктам плановой геодезической сети. Планово-высотная сеть развита в качестве самостоятельной геодезической основы.

В пределах Пур-Надымской инженерно-геологической области широко развиты участки с несливающейся мерзлотой, на которых кровля многолетнемерзлых пород залегает непосредственно с дневной поверхности. Мощность многолетнемерзлой толщи обычно достигает 100–150 м [64].

Согласно схеме общего геокриологического районирования Западно-Сибирской плиты (Геокриология СССР), район изысканий располагается в Центральной зоне Игарко-Нумтинской подзоне Пуровской области и характеризуется массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов (ММГ) различного типа. Район изысканий приурочен к северной части зоны несплошного распространения многолетнемерзлых грунтов различного типа. Талые породы распространены в поймах рек, а также приурочены к незалесенным, хорошо дренированным возвышенным участкам тундры. Мощность ММГ колеблется от 10 до 200 м и более. Температура грунтов изменяется от 0 до минус 3 °С [64].

На большей части рассматриваемого участка толща ММГ имеет преимущественно двухслойное строение. Нижний слой составляют мерзлые реликтовые толщи, кровля которых погружена на глубину 60–100 м, мощность его колеблется в пределах 30–150 м. Мощность ММГ верхнего слоя преимущественно равна 10–70 м. Два эти слоя разделены межмерзлотным таликом, мощность которого колеблется от нескольких метров до 25–30 м.

Влияние сезонной и многолетней мерзлоты на современное рельефообразование выражается через проявление криогенных процессов, которые приводят к возникновению и развитию криогенных форм микрорельефа. Из современных инженерно-геологических процессов на исследуемой территории можно отметить: повсеместное площадное пучение грунтов при сезонном промерзании и сезонное промерзание-протаивание грунтов, разрушение насыпного грунта, неправильно организованного стока атмосферных осадков.

Многолетнемерзлые грунты находятся в устойчивом термодинамическом равновесии и могут сохраняться, формироваться или деградировать при опреде-

ленном сочетании природных инженерно-геологических условий и/или техногенном воздействии, связанном со строительством [64].

Мерзлотные условия являются важнейшим параметром геологической обстановки исследуемой территории, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве, соблюдая соответствующие требования нормативных документов.

2.3.5 Геодезическое обеспечение пространственного мониторинга линейных сооружений на Агапском лицензионном участке

Территория исследований расположена в пределах Таймырского (Долгано-Ненецкого) района Красноярского края.

Агапский лицензионный участок расположен по прямой в 198 км на северо-восток от г. Норильска и в 170 км от г. Дудинка. Расстояние между площадками поисково-оценочных скважин № 6410П и 6411П – 24 км [65].

Развитие планово-высотного обоснования на объекте проводится с использованием следующей методики проведения измерений: планово-высотное обоснование на район проводимых работ развито от пунктов триангуляции. Ведомость обследования исходных геодезических пунктов. Спутниковые наблюдения выполнялись одновременно четырьмя спутниковыми геодезическими приемниками JAVAD TRIUMPH-1. Наибольшие СКО не превышают в плане 0,090 м; по высоте 0,100 м. От пунктов спутниковой сети 1-го порядка были созданы пункты сгущения 2-го порядка – временные реперы изыскиваемых площадок поисково-оценочных скважин № 6410П, 6411П.

Все спутниковые наблюдения выполнялись в режиме «статика», интервал записи 5 секунд. На относительно длинных сторонах наблюдений в спутниковой сети 1-го порядка длительность приема на определяемых пунктах сети составляла в среднем 1 час, на пунктах сети 2-го порядка – от 15 до 30 минут в зависимости от условий и расположения спутникового созвездия. Заранее опреде-

лялись неблагоприятные временные интервалы, и наблюдения продлялись на необходимое время [65].

Опорная геодезическая сеть для обустройства Агапского лицензионного участка показана на рисунке 26.

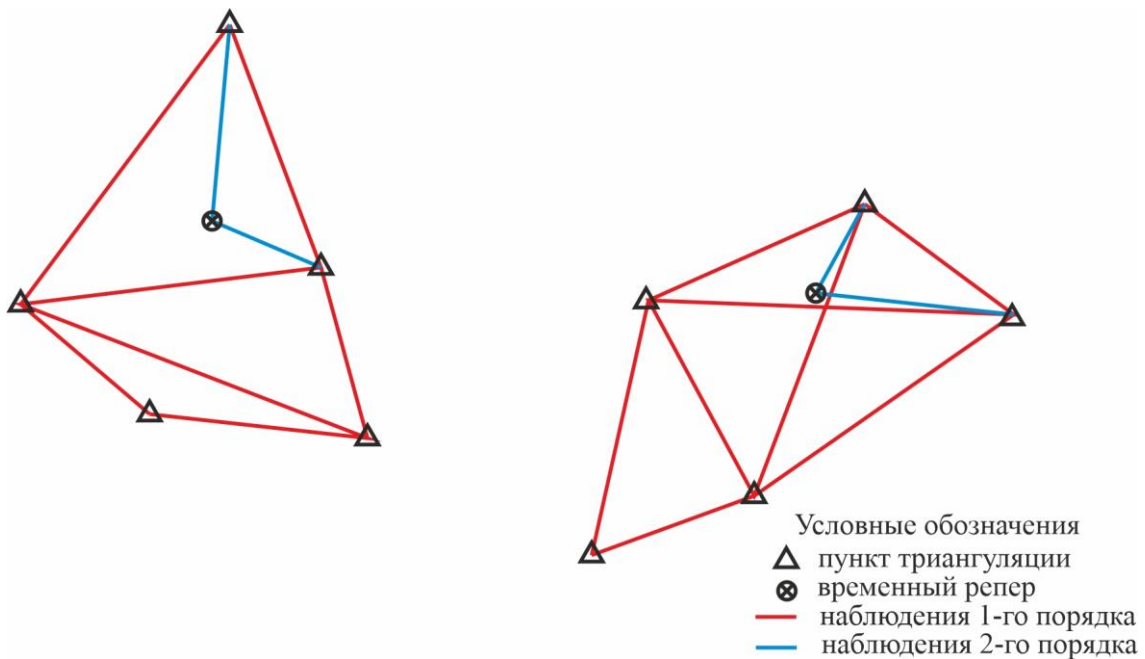


Рисунок 26 – Геодезическое обоснование на Агапском лицензионном участке [65]

Площадки поисково-оценочных скважин № 6410П и № 6411П Агапского лицензионного участка находятся на территории Предтаймырского региона Лено-Анабарского прогиба, расположенного между северной окраиной Сибирской платформы и Таймырской складчатой системой.

В геоморфологическом отношении площадка поисково-оценочной скважины № 6411П приурочена к долине р. Яптояха – левому притоку р. Агапа, к ее третьей правобережной надпойменной террасе. Поверхность площадок покрыта мхом до глубины 0,1 м, находящемся в период изысканий (апрель-май 2014 г.) в мерзлом состоянии. Далее грунты, залегающие ниже границы сезонного протаивания (1,7 м), находятся в многолетнемерзлом состоянии (ММГ) [65].

Для района характерно практически сплошное распространение ММГ. Вскрытая мощность многолетнемерзлых грунтов по данным бурения достигает 15,0 м.

Для обеспечения пространственного мониторинга бугров пучения необходимо составлять регулярную сеть инженерно-геологических разрезов и скважин.

План расположения геологических выработок показан на рисунке 27.

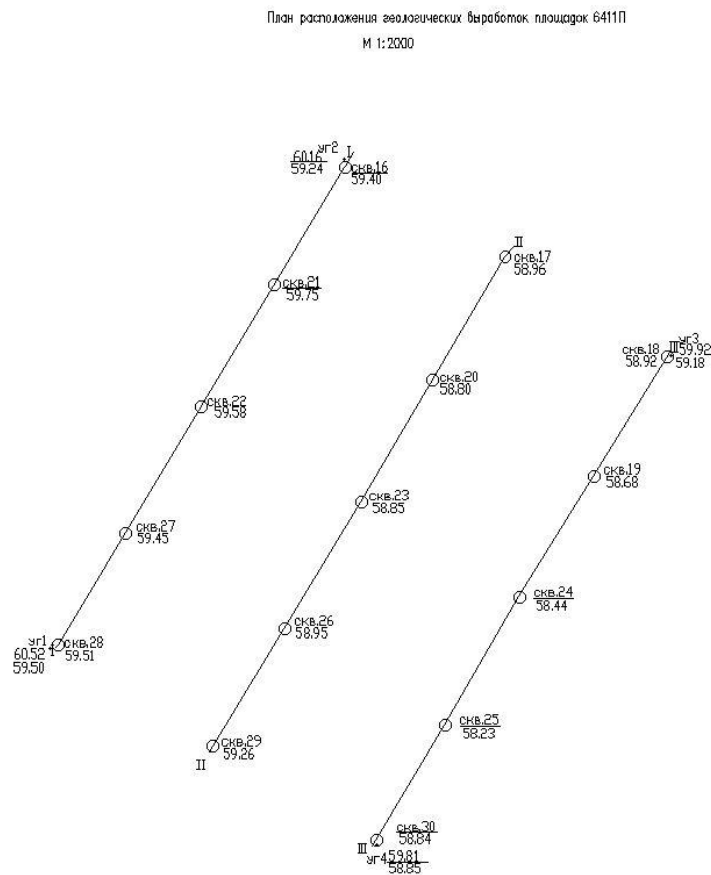
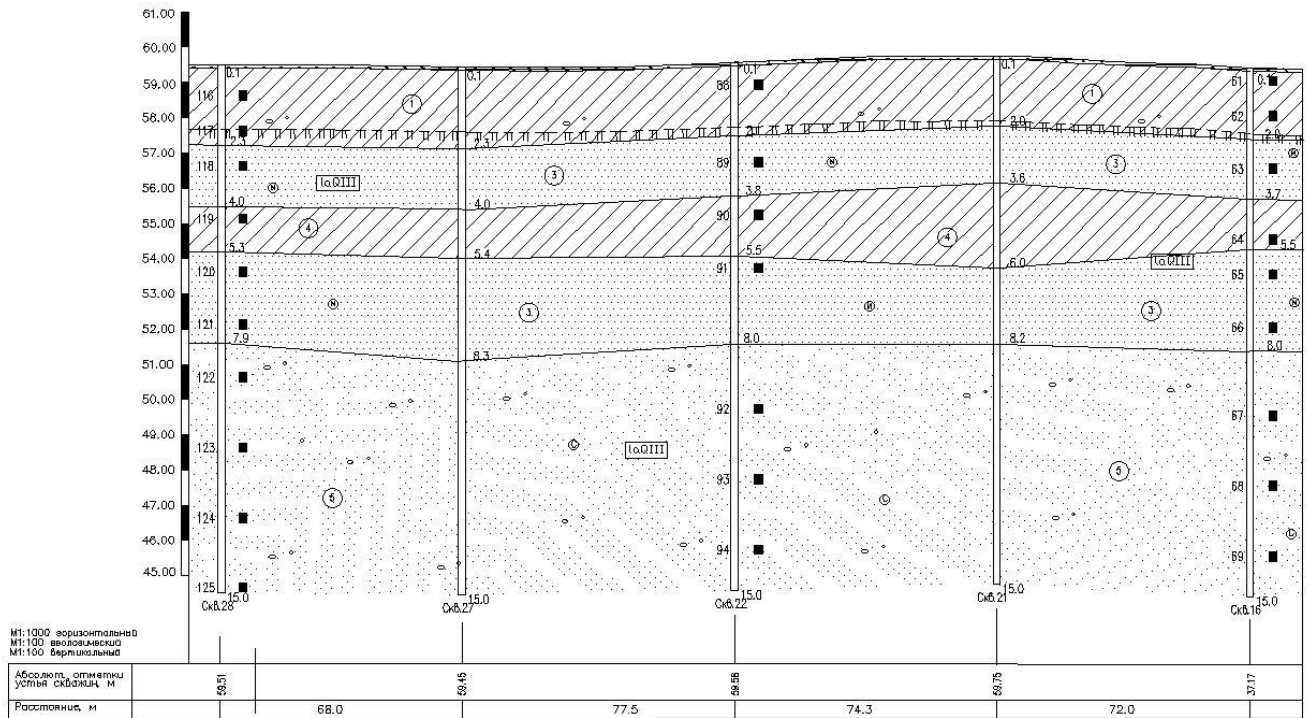


Рисунок 27 – План расположения геологических выработок на Агапском лицензионном участке [65]

Распространение, условия залегания вскрытых грунтов представлены на инженерно-геологических разрезах и скважинах, рисунки 28, 29.

Инженерно-геологический разрез по линии I-I



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Почвенно-растительный слой (моховой)
- ИГЭ-1. Суслинок серый, твердомерзлый, слоисто-сетчатой криотекстуры, льдистый с включением гальки и гравия до 5%
- ИГЭ-3. Песок серый мелкий, твердомерзлый, массивной криотекстуры, слабольдистый
- ИГЭ-4. Суслинок серый, твердомерзлый, слоистой криотекстуры, слабольдистый,
- ИГЭ-5. Песок серый средней крупности, твердомерзлый, массивной криотекстуры, слабольдистый с включением гальки и гравия до 5%
- номер инженерно-геологического элемента
- геологический возраст
- включения гальки и гравия

Рисунок 28 – Инженерно-геологический разрез по линии I-I [65]

Инженерно-геологические условия района изысканий осложняются развитием болот. Заболачивание имеет самое широкое распространение. Этому способствуют климатические, геоморфологические и мерзлотные условия территории.

Объект: Площадка 6411П

Местоположение: см. схему

Геоморфологическая приуроченность: Вторая надпойменная терраса р. Куба

Абс.отм. 37.17 м

Глубина 15.00 м

Способ бурения: колонковое

Ø 108 мм

Дата бурения: 26/04/2014 г

СТРАТИГР. ИНДЕКС	N ИГЭ	АБС. ОТМ.	ГЛУБ. ЗАП.	МОЩНОСТЬ	О П И С А Н И Е Г Р У Н Т О В			Глубина под. вод (м) по в. уст.
QIV		37.07	0.10	0.10	Почвенно-растительный (ископае) слой QIV			Воды нет
	1	35.17	2.00	1.90	Суглинок серый, слоисто-сетчатой криотекстуры, твердомерзлый, льдистый, в талом состоянии текучий, с вкл. до 5% гальки и гравия	61		
	3	33.47	3.70	1.70	Песок мелкий серый, массивной криотекстуры, твердомерзлый, слабольдистый, в талом состоянии водонасыщенный	62		
	4	31.67	5.50	1.80	Суглинок серый, массивной криотекстуры, твердомерзлый, слабольдистый, в талом состоянии текучепластичный	63		
	3	29.17	8.00	2.50	Песок мелкий серый, массивной криотекстуры, твердомерзлый, слабольдистый, в талом состоянии водонасыщенный	64		
						65		
						66		
						67		
						68		
ЮQIII	5	22.17	15.00	7.00	Песок средней крупности серый, массивной криотекстуры, твердомерзлый, слабольдистый, в талом состоянии водонасыщенный, с вкл. до 5% гальки и гравия	69		

Рисунок 29 – Фрагмент описания инженерно-геологической скважины [65]

2.4 Анализ методики геопространственного мониторинга на нефтегазовых месторождениях

При хозяйственном освоении территории происходит нарушение снежного и растительного покрова, их частичное или полное удаление. При этом изменяются условия теплообмена. Таким образом, естественная динамика природных факторов и хозяйственная деятельность человека приведут к изменению температурного режима и мощности СТС (сезонно-талого слоя). При этом возникает вероятность формирования новообразований ММГ (бугры пучения), таликовых прослоев и зон, образование новых термокарстовых понижений. Исследования инженер-

но-геокриологических условий и опыт освоения на территории данного региона показывают, что строительство сооружений в данном регионе может вызвать активизацию опасных экзогенных геологических процессов, приводящих к потере устойчивости инженерных сооружений и необратимым изменениям природной среды. В таблице 4 приведены данные по методам создания опорных сетей, ходам сгущения и количеству геологических выработок по Самбургскому месторождению, Агапскому и Олимпийскому лицензионным участкам.

Таблица 4

Наименование месторождений	Географические координаты	Площадь	Опорная сеть ГНСС. Количество пунктов	Ходы сгущения	Количество геологических выработок
Самбургское месторождение	66°50'03" с. ш. 77°14'55" в. д.	нет данных	4	Построения сети с использованием спутниковых приемников	47
Агапский лицензионный участок	71°54'59" с. ш. 93°42'55" в. д.	нет данных	4	Теодолитные ходы. Техническое нивелирование	12
Олимпийский лицензионный участок	65°24'37" с. ш. 77°46'33" в. д.	нет данных	4	Построения сети с использованием спутниковых приемников. Теодолитные ходы. Техническое нивелирование	70

При построении сети с использованием спутниковых приемников предельные погрешности положения пунктов планового съемочного обоснования относительно пунктов государственной геодезической сети не превышают 0,3 мм в масштабе плана.

При проложении теодолитных ходов допустимая невязка линейных измерений не превышала 1/2 000.

Измерение углов в теодолитных ходах производилось одним приемом.

Допустимая угловая невязка вычисляется по формуле

$$F_{\beta\text{доп}} = \pm 1' \sqrt{n}, \quad (14)$$

где n – число углов в ходе.

Ходы технического нивелирования проложены между временными реперами в виде замкнутого хода. Техническое нивелирование выполнено с допустимой невязкой определенной по формуле [23]

$$f_{h\text{доп}} = \pm 50 \text{ мм} \sqrt{L}, \quad (15)$$

где L – длина хода, км.

В работе Биндера И. О. предлагается изменить подход к назначению точности геодезических работ для территорий нефтегазовых месторождений с буграми пучения вечной мерзлоты в зависимости от распределения бугров пучения, площади месторождения, диаметра трубопровода и числа бугров пучения на 1 км² (более 50 %). В таблице 5 приводится рекомендуемая точность геодезических работ для территорий нефтегазовых месторождений с буграми пучения вечной мерзлоты [8].

Таблица 5

Распределение бугров пучения мерзлоты	Процент бугров пучения на 1 кв. км	Рекомендуемая точность геодезических измерений
Неравномерное	Менее 50 %	$F_{\beta\text{доп}} = \pm 1' \sqrt{n},$ $f_{h\text{доп}} = \pm 50 \text{ мм} \sqrt{L}$
Неравномерное	От 50 % и более	$F_{\beta\text{доп}} = \pm 30'' \sqrt{n},$ $f_{h\text{доп}} = \pm 20 \text{ мм} \sqrt{L}$

В таблице 6 приведены данные по проведенным инженерным изысканиям.

Таблица 6

Наименование месторождений	Географические координаты	Инженерно-геодезические изыскания	Инженерно-геологические изыскания	Инженерно-гидрометеорологические изыскания	Инженерно-экологические изыскания
Самбургское месторождение	66°50'03" с. ш. 77°14'55" в. д.	+	+	+	-
Агапский лицензионный участок	71°54'59" с. ш. 93°42'55" в. д.	+	+	+	-
Олимпийский лицензионный участок	65°24'37" с. ш. 77°46'33" в. д.	+	+	+	-

Нарушение термического режима пород, изменение гидрогеологических условий, как правило, вызывает развитие разнообразных инженерно-геологических процессов и явлений, часто оказывающих отрицательное влияние на устойчивость инженерных сооружений.

Среди современных экзогенных геологических процессов, развитых в исследуемом районе, ведущая роль принадлежит процессам пучения грунтов и заболачивания. Они имеют практически повсеместное распространение.

Многолетнее пучение является одним из наиболее важных в инженерном отношении процессов. При строительстве в районах его появления возможны значительные деформации возводимых сооружений как при оттаивании ММГ, так и при их новообразовании. Многолетнее пучение в данном регионе представлено пассивными проявлениями в виде многочисленных бугров пучения высотой до 6 м. Распространены также формы площадного пучения торфяников. Этот тип пучения представлен низкими торфяниками, занимающими центральные части водоразделов. Пучению подвергается лишь верхний торфяной горизонт мощностью 1-2 м и потому величина пучения невелика [21].

Сезонное пучение проявляется в минеральных грунтах при их предзимней влажности, близкой к 0,9, и при достаточно больших (1,5–2,0 м) глубинах промерзания-протаивания. Максимально процесс проявляется на плоских заболоченных участках, сложенных торфяниками, суглинками и пылеватыми супесями, минимально – на сухих возвышенных территориях, сложенных песчаными грунтами.

На участках проявления процессов пучения возможны довольно значительные деформации возводимых сооружений, такие как выпучивание, изгиб и даже разрыв трубы при подземном и наземном способе ее прокладки, нарушение изоляции; выпучивание и перекос различных сооружений, задвижек; образование пучин на дорогах, идущих вдоль трасс и т. д. [15].

Инженерное значение этого процесса весьма велико, так как при строительных работах процесс может активизироваться и привести к значительным осадкам грунтов.

Поскольку эффективность разработки нефтегазового месторождения зависит от достаточно большого количества инженерных сооружений, от линейных, (автодорог, линий электропередач, трубопроводов), от площадных объектов (кустовых площадок, дожимных насосных станций, электроподстанций, компрессорных станций), то всегда возникает необходимость сгущения опорной геодезической сети. Предпочтительно целесообразно отдавать геодезическим сетям в виде замкнутых полигонов [6, 40].

Наличие многолетнемерзлых грунтов в районе изысканий является определяющим фактором при принятии проектных решений.

Влияние сезонной и многолетней мерзлоты на современное рельефообразование выражается через проявление криогенных процессов, которые приводят к возникновению и развитию криогенных форм микрорельефа.

Расположение бугров пучения, содержащих внутри себя многолетнемерзлые грунты, а также их количество, существенно осложняет изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию коридоров линейных коммуникаций [15].

При проведении инженерно-геодезических изысканий на Крайнем Севере одним из проблемных вопросов является вопрос сохранности государственной геодезической основы. Это создает массу дополнительных трудностей при проведении изыскательских работ: везде, где необходимо выполнять планово-высотную привязку строящихся или эксплуатирующихся объектов. Вследствие того, что повторный контроль пунктов ГГС не выполнялся, не было повторных обследований, очень большое количество центров можно считать в настоящее время утраченными. Вечная мерзлота год за годом выдавливает пункт, и этот процесс очень сильно зависит от физико-географических условий Крайнего Севера. Еще одной проблемой является неоднородность государственной геодезической сети по точности.

Мерзлотные условия являются важнейшим параметром геологической обстановки исследуемой территории, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве, соблюдая соответствующие требования нормативных документов.

При проведении инженерно-геологических изысканий существует наиболее распространенные ошибки и недочеты:

- для ММГ не указываются: среднегодовая температура грунтов на глубине нулевых годовых колебаний температуры; температура начала замерзания; границы распространения, условия формирования и интенсивность развития криогенных процессов и образований (бугры пучения, термокарст);
- отсутствуют рекомендации по выбору принципов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований фундаментов;
- имеются разночтения сведений о засоленности грунтов;
- не указывается категория опасности природных процессов землетрясения, пучения и подтопления и т. д.

Анализ результатов наблюдений процесса изменения температурного режима показывает, что за период 12–15 лет с момента возникновения бугров происходит развитие термоэрозии и эоловых процессов.

Выводы по второму разделу

Геопространственный мониторинг должен включать в себя наблюдения за подземной и наземной составляющей многолетнемерзлых форм рельефа. Наземная составляющая мониторинга во многом зависит от развития ГНСС-технологий и электронной тахеометрии. Эти технологии успешно внедрены в производство и эффективно используются при изысканиях и обустройстве нефтегазовых месторождений. Точность выполнения работ регламентируется СП 11-104–97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» [82], ГКИНП (ОНТА)-02-262–02 «Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» [24], СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства» [87] и другой нормативной литературой».

Для уменьшения последствий техногенного воздействия на геокриологические условия рекомендуется:

- сохранение многолетнемерзлого состояния на участке развития многолетнемерзлых грунтов с целью предотвращения осадок;
- предусмотреть мероприятия, обеспечивающие сохранение расчетного теплового режима грунтов основания в процессе строительства и эксплуатации;
- при определении состояния подземной составляющей многолетнемерзлых форм рельефа предлагается построение регулярной сети геологических скважин в районах распространения бугров пучения с повышенной точностью координатной привязки;
- проектирование объектов должно вестись по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов в основаниях проектируемых объектов, необходимо устанавливать специальные правила проектирования, строительства и эксплуатации проектируемых сооружений, которые должны быть направлены к сокращению площадей техногенных нарушений;

– точность выноса и привязки геологических скважин для получения 3D-модели бугров пучения должна быть повышена по сравнению с действующими нормативными документами.

Во избежание развития неблагоприятных процессов, и как следствие деформации сооружений возникает необходимость разработки методики геопро пространственного мониторинга территорий распространения многолетнемерзлых форм рельефа.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БУГРОВ ПУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

3.1 Разработка методических рекомендаций по производству инженерно-геодезические изысканий при ведении геопространственного мониторинга в районах с буграми пучения вечной мерзлоты

Трудность производства инженерных изысканий на этих территориях заключается, наряду с другими факторами, еще и в том, что нормативно-техническая литература практически не регламентирует пространственное расположение коридоров коммуникаций и инженерных сооружений относительно бугров пучения или «провалов» в тундре. Васильчук Ю. К. убедительно показал несовершенство рекомендаций строительных норм и правил для проектировщиков и изыскателей при выборе места расположения линейных коммуникаций [15].

Пункт 7.11 свода правил (СП 36.133330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85) дает лишь общие рекомендации к проектированию коридоров коммуникаций на таких территориях [83]. В актуализированную редакцию свода правил должны быть внесены конкретные рекомендации по размещению коридора линейных коммуникаций относительно наземной и подземной составляющих, бугра пучения. Такие рекомендации разработаны и представлены в статье «О необходимости актуализации строительных норм и правил по инженерно-геодезическим изысканиям для районов Крайнего Севера» [58].

Вышеприведенные исследования бугров пучения показывают, что возникает острая необходимость проведения их комплексных изысканий, одной из составляющей которых являются инженерно-геодезические изыскания.

В противном случае на этапе выполнения комплексных инженерных изысканий возможно возникновение ситуаций, подобной ситуации на Сугмутском ме-

сторождении, когда положение нефтепровода пришлось переносить из-за бугра пучения, высота которого превышала 5 м [8].

Обустройство нефтегазовых месторождений в районах распространения ММГ пучения носит комплексный характер. Приходится решать одновременно большое количество вопросов с выбором мест размещения инженерных сооружений; кустовых площадок, подъездных дорог, ДНС, КНС, вахтовых поселков, объектов и сооружений электроснабжения и связи, факельных систем с трубопроводами, центральных пунктов сбора и подготовки нефти, газа, воды и т. п. На Ямбургском месторождении возникла необходимость в корректировке земельных отводов из-за двух бугров пучения, находящихся в непосредственной близости, и в изменении вариантов трасс автомобильной дороги. Схема вариантов проектирования линейного сооружения на месторождении представлена на рисунке 30.

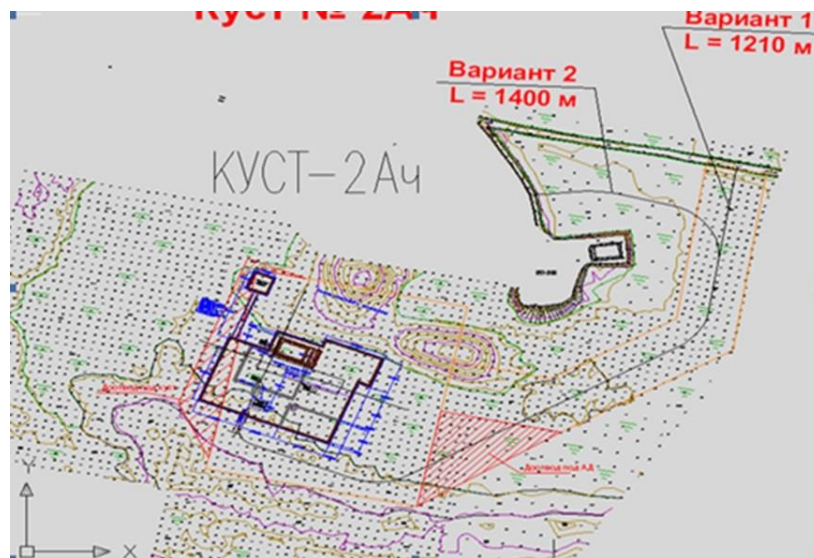


Рисунок 30 – Схема вариантов проектирования линейного сооружения на месторождении [58]

В этих условиях, при эксплуатации инженерных сооружений необходимо учитывать воздействие бугров пучения, находящихся на территории месторождения. Для того чтобы оценить и спрогнозировать степень влияния изменения геометрических параметров бугров пучения на жизненный цикл того или иного ин-

женерного сооружения, необходимо проводить пространственный мониторинг бугров пучения.

Одним из элементов мониторинга, который позволяет объективно оценить ситуацию на этапе инженерных изысканий, являются измерения температуры внутри геологических скважин на различных глубинах.

Самбургское месторождение

На территории нефтегазового месторождения разбивалась сетка геологических скважин по оси X через 20 м, по оси Y – примерно через 50 м [63]. Схема геологических скважин представлена на рисунке 31.

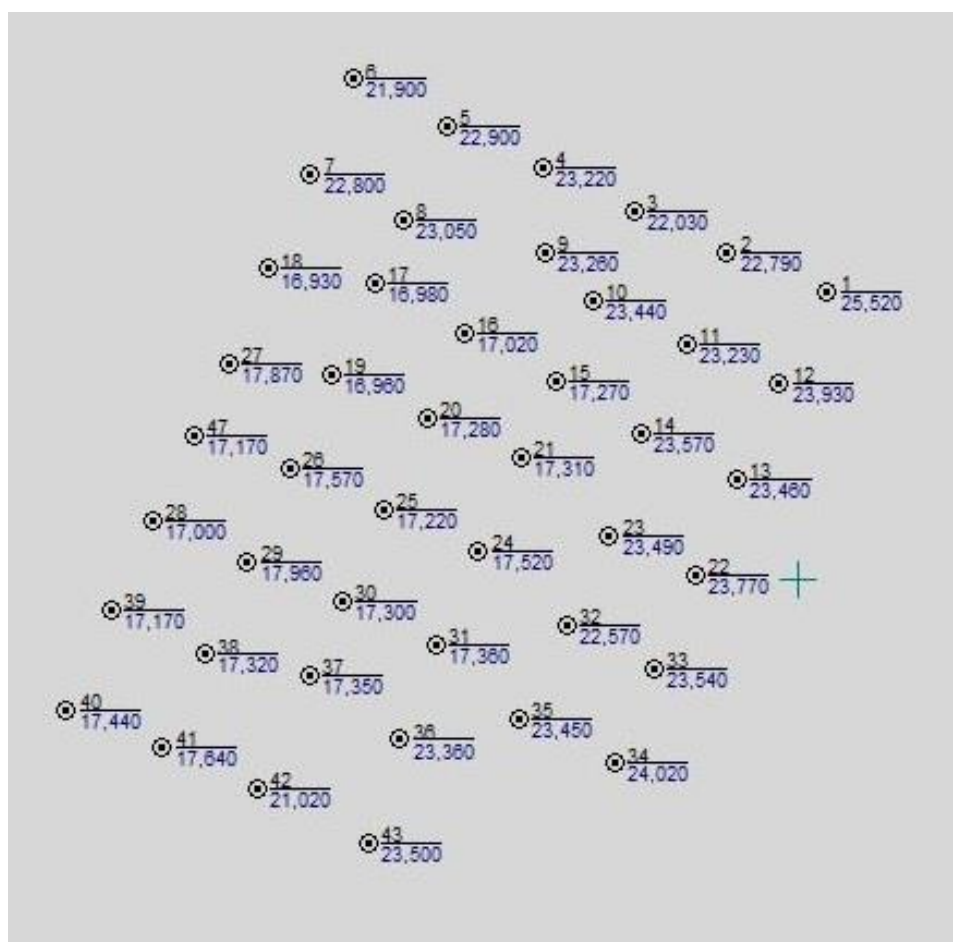


Рисунок 31 – Схема геологических скважин

В таблице 7 представлены результаты измерений температуры внутри геологических скважин на разных глубинах.

Таблица 7

№ скважин	Глубина (в метрах)																			
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СКВ 1	-2,50	-1,49	-0,80	-0,60	-0,40	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,10	-0,20	-0,25	-0,28	-0,29	-0,38	-0,40	-0,42	-0,48	-0,49
СКВ 3	-2,00	-1,41	-0,30	-0,20	-0,10	0,00	0,00	-0,10	-0,14	-0,15	-0,17	-0,21	-0,25	-0,26	-0,27	-0,30	-0,35	-0,36	-0,39	-0,40
СКВ 6	-2,10	-1,43	-0,40	-0,30	-0,20	0,00	0,00	0,20	0,19	0,02	-0,18	-0,22	-0,25	-0,29	-0,30	-0,39	-0,41	-0,44	-0,45	-0,45
СКВ 9	-2,15	-1,39	-0,20	-0,20	-0,25	0,10	0,20	0,21	0,05	0,03	-0,10	-0,20	-0,24	-0,24	-0,25	-0,35	-0,40	-0,41	-0,46	-0,47
СКВ 11	-2,30	-1,45	-0,31	-0,24	-0,01	0,12	0,20	0,10	0,01	-0,10	-0,15	-0,18	-0,20	-0,21	-0,29	-0,30	-0,32	-0,35	-0,40	-0,40
СКВ 13	-2,41	-1,37	-0,30	-0,10	-0,10	0,00	0,20	0,30	0,21	0,11	0,05	-0,09	-0,16	-0,30	-0,31	-0,38	-0,45	-0,49	-0,49	-0,50
СКВ 17	-2,46	-1,46	-0,24	-0,12	0,09	0,12	0,15	0,20	0,15	0,05	-0,14	-0,18	-0,20	-0,24	-0,25	-0,26	-0,30	-0,34	-0,41	-0,42
СКВ 20	-2,43	-1,35	-0,10	-0,01	0,12	0,20	0,16	0,10	-0,13	-0,13	-0,14	-0,15	-0,20	-0,29	-0,30	-0,32	-0,35	-0,40	-0,45	-0,46
СКВ 23	-2,14	-1,42	-0,60	-0,40	-0,30	0,00	0,10	0,15	0,08	0,10	-0,12	-0,20	-0,27	-0,27	-0,28	-0,34	-0,40	-0,45	-0,50	-0,51
СКВ 25	-2,19	-1,36	-0,30	-0,20	-0,20	0,20	0,10	0,00	0,01	-0,10	-0,15	-0,20	-0,23	-0,24	-0,26	-0,28	-0,30	-0,38	-0,39	-0,40
СКВ 26	-2,28	-1,48	-0,12	-0,09	0,11	0,21	0,13	0,00	0,02	-0,16	-0,18	-0,20	-0,24	-0,30	-0,31	-0,34	-0,38	-0,40	-0,46	-0,50
СКВ 30	-2,50	-1,50	-0,50	-0,30	-0,24	-0,12	-0,18	-0,21	-0,24	-0,25	-0,25	-0,26	-0,28	-0,28	-0,28	-0,32	-0,34	-0,38	-0,40	-0,41
СКВ 40	-2,43	-1,51	-0,40	-0,20	-0,10	0,01	0,10	0,13	0,15	0,20	-0,01	-0,18	-0,28	-0,28	-0,30	-0,38	-0,40	-0,42	-0,50	-0,50
СКВ 43	-2,40	-1,42	-0,60	-0,20	-0,12	0,08	0,10	0,14	0,12	0,08	-0,10	-0,24	-0,27	-0,29	-0,30	-0,42	-0,50	-0,54	-0,59	-0,60

По этим данным могут быть определены участки с максимальными и минимальными перепадами температур, а также выявлено самое «стабильное место» для закладки временных реперов. Последние могут быть включены в нивелирный ход, который прокладывается с целью обнаружения изменений в геометрических характеристиках бугров пучения [63].

По результатам измерения температур в геологических скважинах построен объединенный график изменения температуры в зависимости от глубины измерений и расположения скважин [76], рисунок 32.

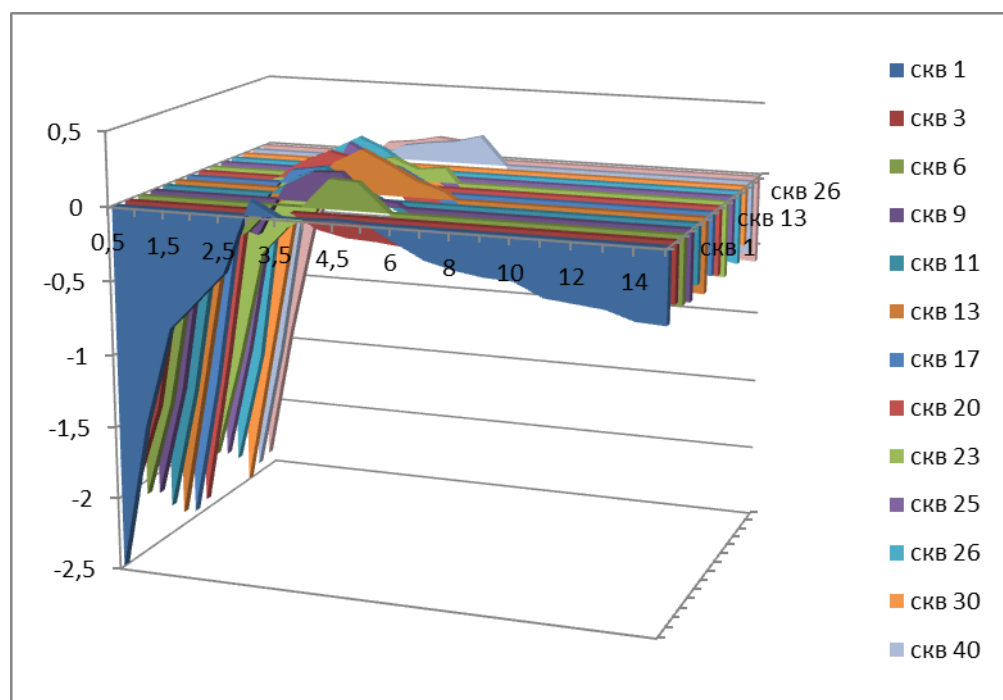


Рисунок 32 – График изменения температуры в зависимости от глубины измерений и расположения скважин на Самбургском месторождении

С помощью программного комплекса MapInfo разработаны модели температурных полей в районе расположения геологических скважин, в которых было выполнено измерение температуры. В каждой скважине выполнялись температурные измерения на разных глубинах с шагом 0,5 до 5 м, и далее с шагом 1 м до глубины 15 м, рисунки 33–37.

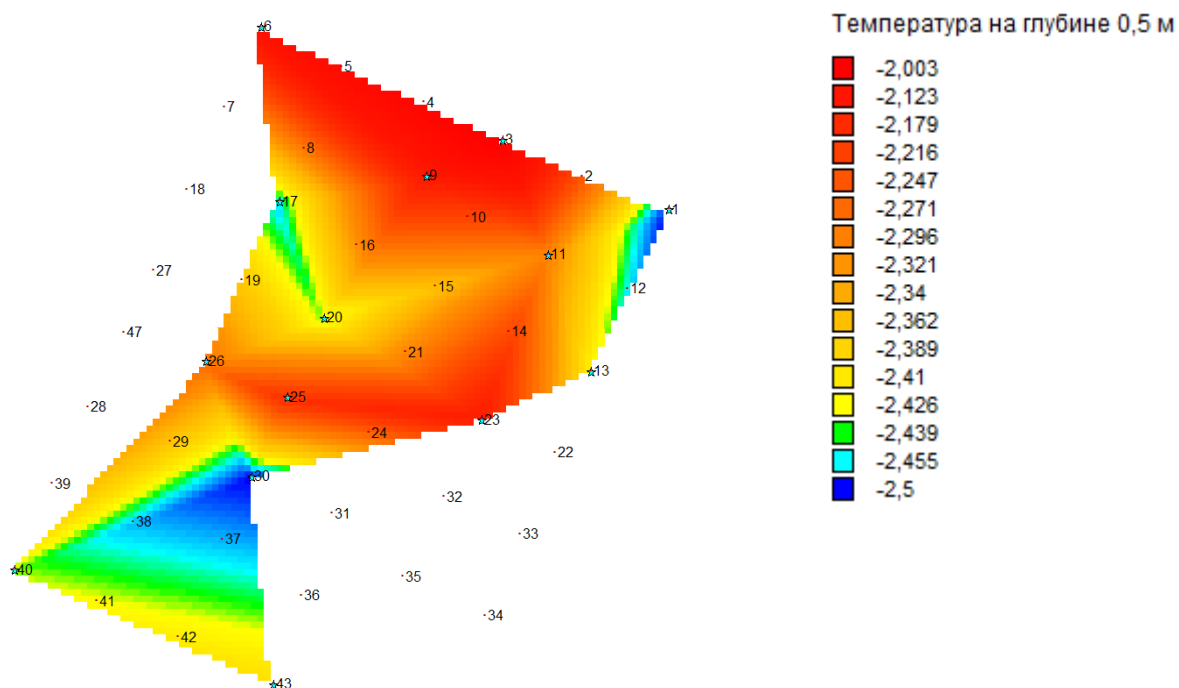


Рисунок 33 – Модель температурных полей на Самбургском месторождении, глубина 0,5 м

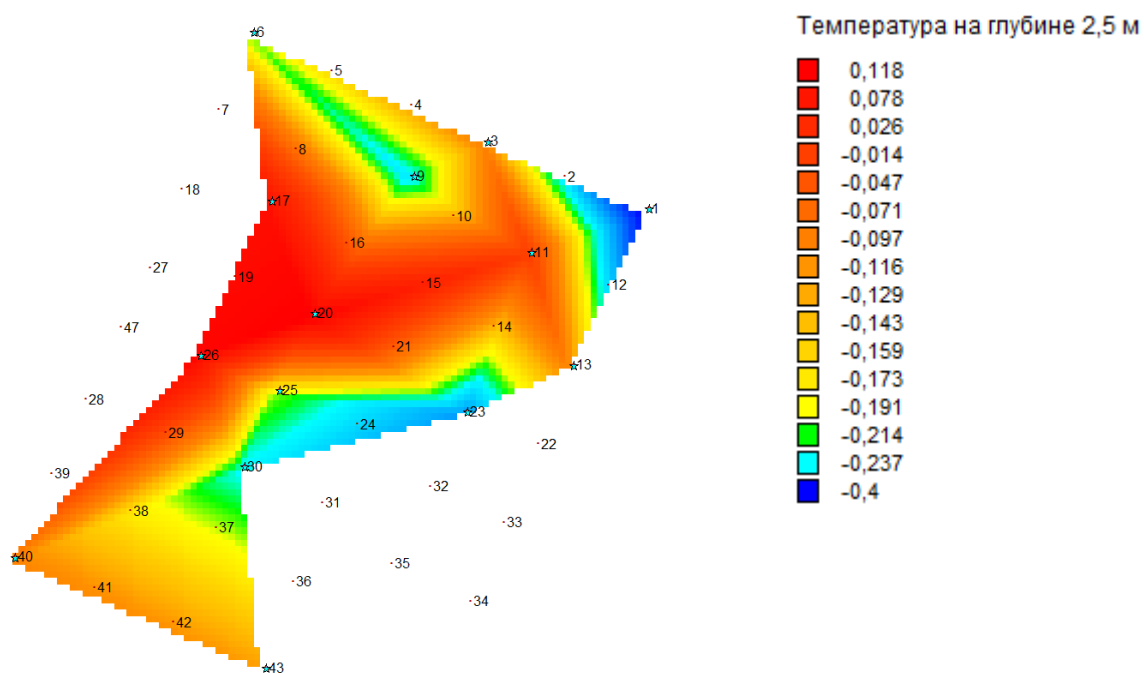


Рисунок 34 – Модель температурных полей на Самбургском месторождении, глубина 2,5 м

Модель, изображенная на рисунке 33, показывает, что область низких температур находится в районе скважин 6, 30 и 37.

Модель температурных полей на рисунке 34 показывает на изменение местоположения области низких температур.

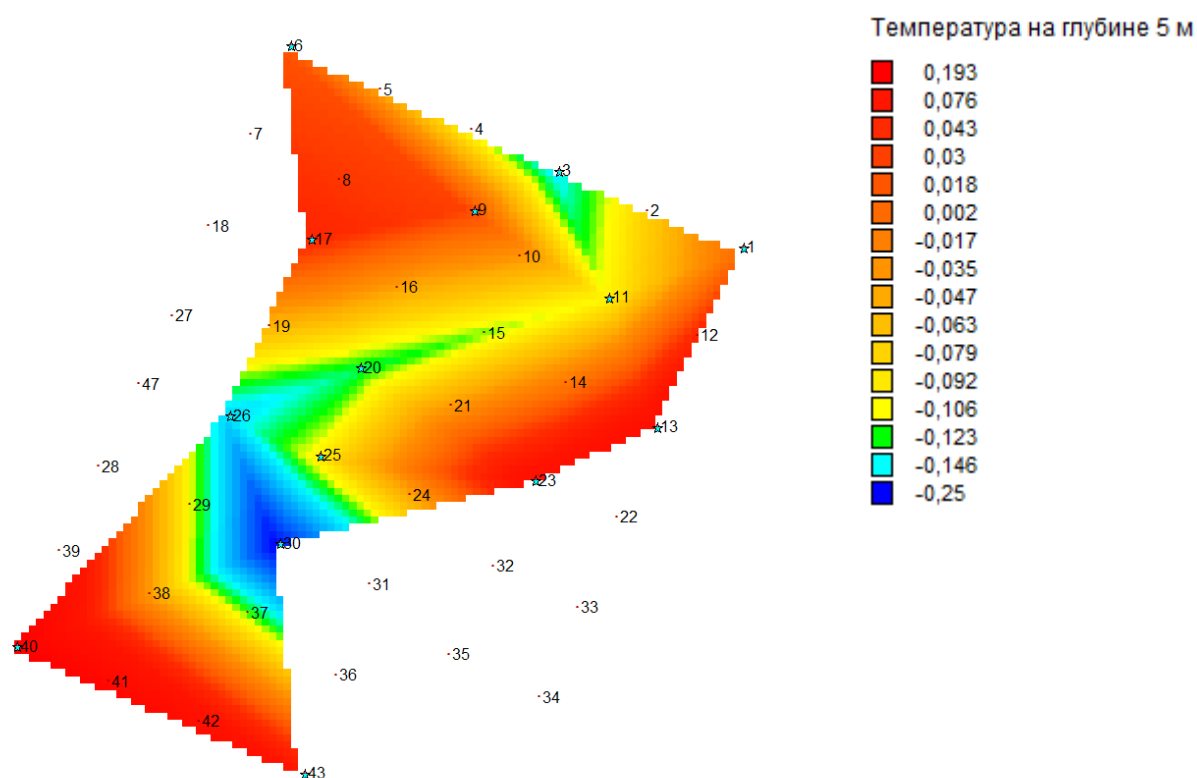


Рисунок 35 – Модель температурных полей на Самбургском месторождении, глубина 5,0 м

Модель температурных полей на рисунке 35 показывает, что при увеличении глубины скважин продолжает изменяться область низких температур.

При увеличении глубины скважин область низких температур изменяет свое положение и переходит в район скважины 43. Наиболее стабильным местом в температурном отношении является район расположения скважин 15, 16, что позволяет выбрать место для закладки долговременных геодезических пунктов.

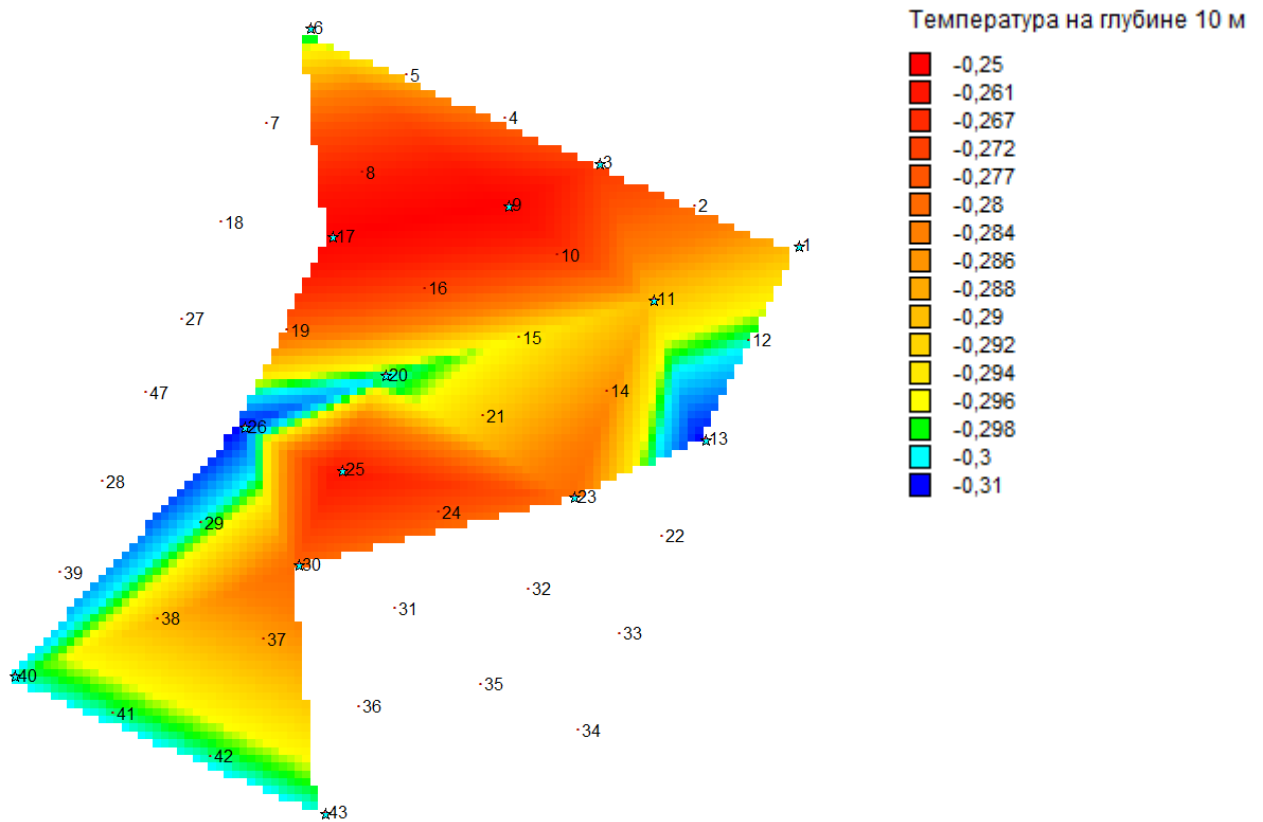


Рисунок 36 – Модель температурных полей на Самбургском месторождении, глубина 10,0 м

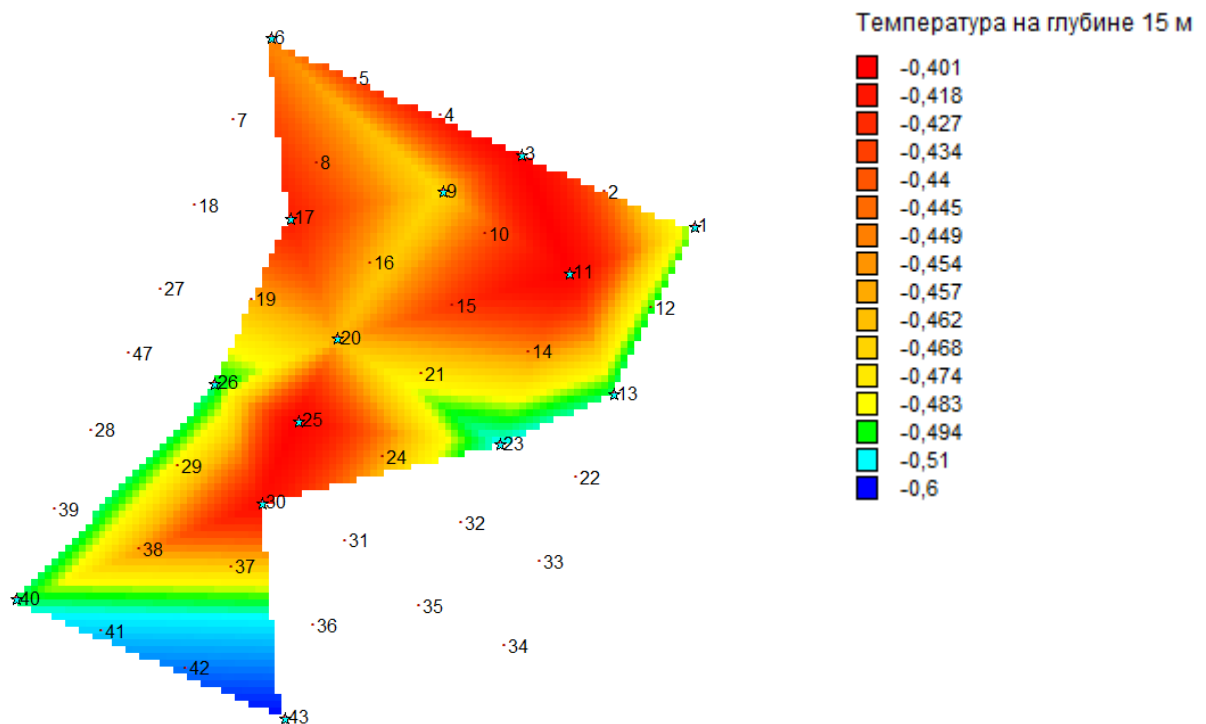


Рисунок 37 – Модель температурных полей на Самбургском месторождении, глубина 15,0 м

Аганский лицензионный участок

На территории площадок поисково-оценочных скважин разбивалась сетка геологических скважин [65]. Схема геологических скважин представлена на рисунке 38.

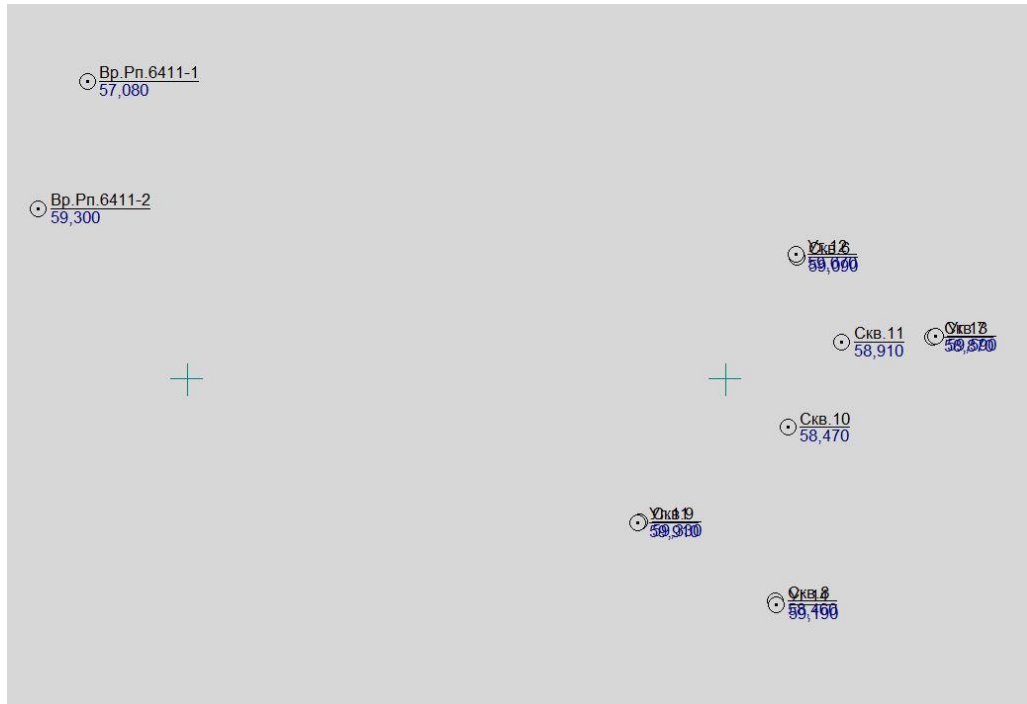


Рисунок 38 – Схема геологических скважин

В таблице 8 представлены результаты измерений температуры внутри геологических скважин на разных глубинах. По этим данным могут быть определены участки с максимальными и минимальными перепадами температур, а также выявлено самое «стабильное место» для закладки временных реперов. Последние могут быть включены в нивелирный ход, который прокладывается с целью обнаружения изменений в геометрических характеристиках бугров пучения.

По результатам измерения температур в геологических скважинах построен объединенный график изменения температуры в зависимости от глубины измерений и расположения скважин, рисунок 39.

Таблица 8

№ скважин	Глубина (в метрах)														
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
сква 6	-0,31	-0,37	-0,42	-0,55	-0,76	-0,83	-0,9	-1,05	-1,11	-1,27	-1,36	-1,45	-1,58	-1,6	-1,60
сква 7	-0,33	-0,44	-0,46	-0,58	-0,78	-0,85	-0,96	-1,09	-1,2	-1,32	-1,43	-1,5	-1,65	-1,67	-1,68
сква 8	-0,35	-0,5	-0,51	-0,6	-0,72	-0,8	-0,94	-1,08	-1,18	-1,29	-1,41	-1,52	-1,6	-1,64	-1,65
сква 9	-0,38	-0,46	-0,53	-0,63	-0,73	-0,8	-0,9	-0,98	-1,12	-1,24	-1,41	-1,52	-1,63	-1,65	-1,65
сква 10	-0,34	-0,42	-0,54	-0,61	-0,73	-0,79	-0,83	-1,07	-1,19	-1,36	-1,54	-1,65	-1,8	-1,81	-1,82
сква 11	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,75	-0,8	-0,89	-1,08	-1,2	-1,39	-1,58	-1,69	-1,83	-1,85	-1,86

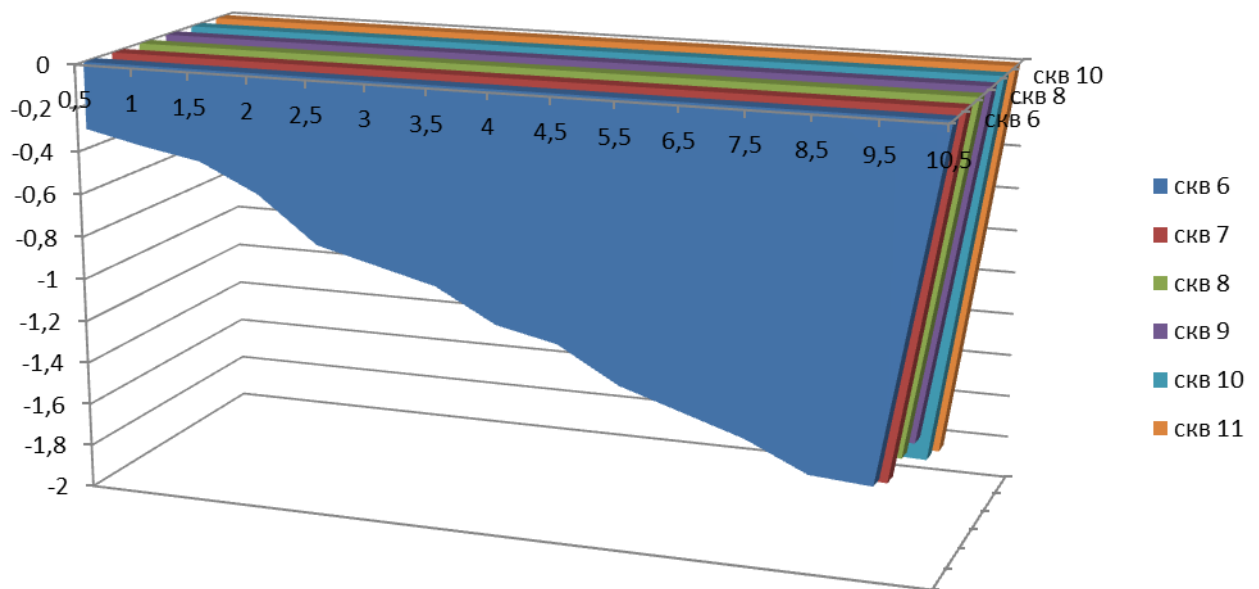


Рисунок 39 – График изменения температуры в зависимости от глубины измерений и расположения скважин на Самбургском месторождении

С использованием программного комплекса MapInfo разработаны модели температурных полей в районе расположения геологических скважин, в которых было выполнено измерение температуры. В каждой скважине выполнялись температурные измерения на разных глубинах с шагом 0,5 до 5 м, и далее с шагом 1 м до глубины 15 м, рисунки 40–44.

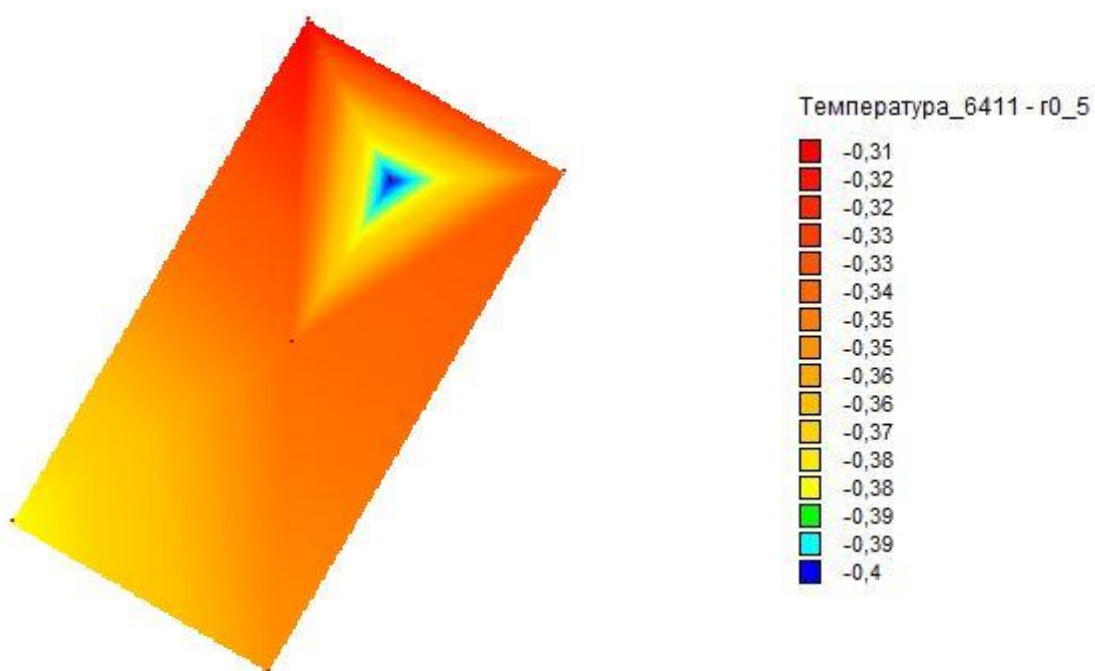


Рисунок 40 – Модель температурных полей на Агапском лицензионном участке, площадке поисково-оценочной скважины № 6411П, глубина 0,5 м

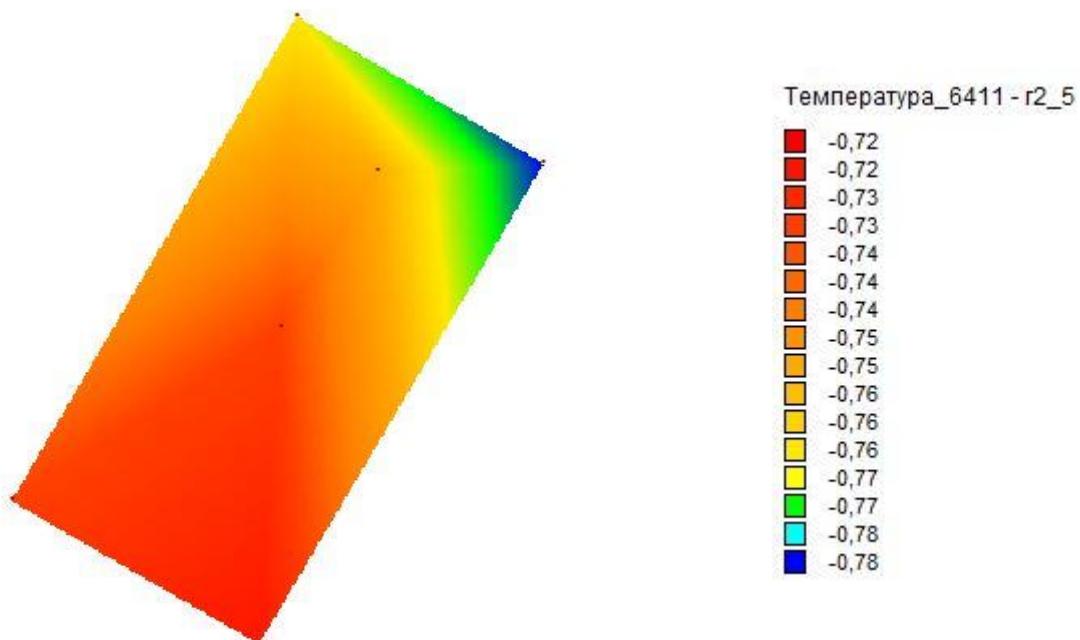


Рисунок 41 – Модель температурных полей на Агапском лицензионном участке, площадке поисково-оценочной скважины № 6411П, глубина 2,5 м

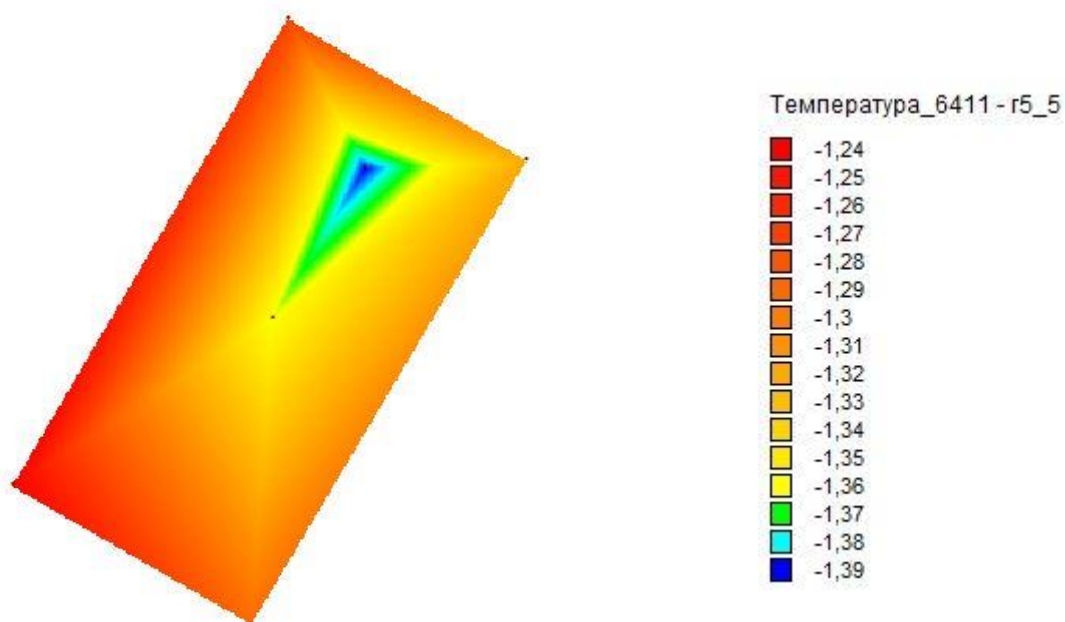


Рисунок 42 – Модель температурных полей на Агапском лицензионном участке, площадке поисково-оценочной скважины № 6411П, глубина 5,5 м

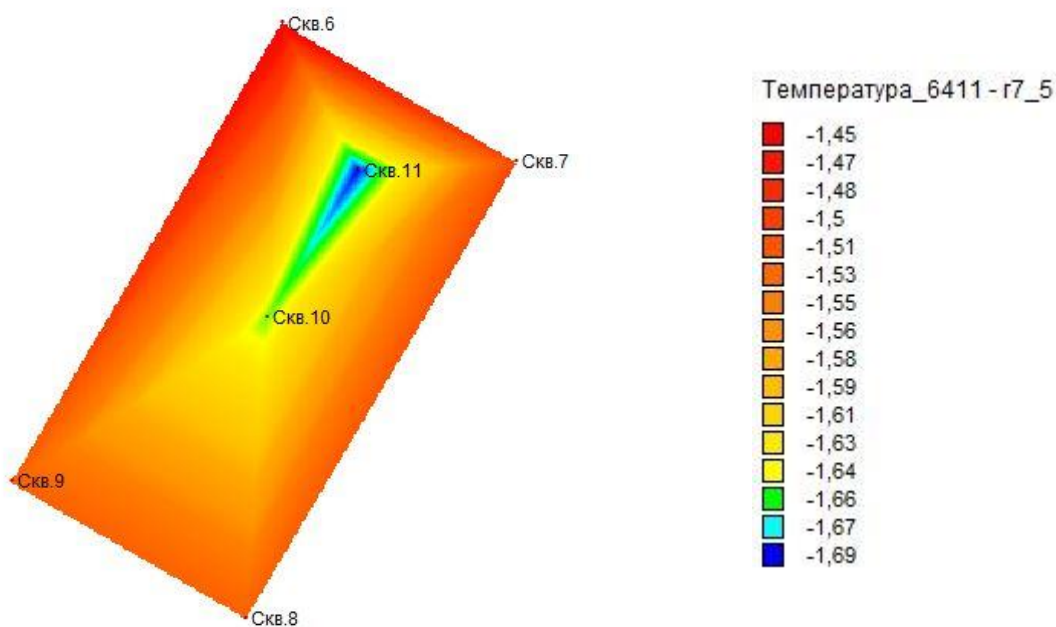


Рисунок 43 – Модель температурных полей на Агапском лицензионном участке, площадке поисково-оценочной скважины № 6411П, глубина 7,5 м

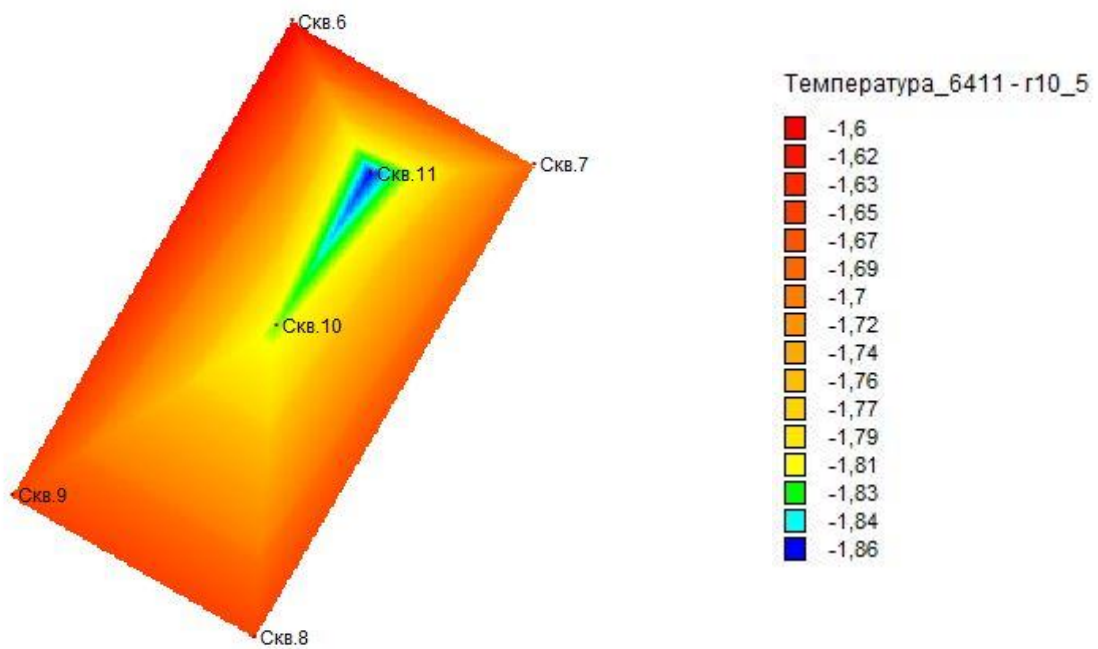


Рисунок 44 – Модель температурных полей на Агапском лицензионном участке, площадке поисково-оценочной скважины № 6411П, глубина 10,5 м

Анализ производственных материалов инженерных изысканий на Агапском лицензионном участке показал, что на площади отсутствовала регулярная сеть геологических скважин. Термометрия выполнялась в шести геологических скважинах, на глубинах от 0,5 до 15 м. На наш взгляд, такое количество скважин недостаточно для полноценного моделирования областей стабильности низких температур.

3.2 Определение коэффициента корреляции моделей температурных полей на Самбургском месторождении и Агапском лицензионном участке

Корреляционную связь условно можно рассматривать как своего рода функциональную связь средней величины одного признака (результативного) со значением другого (или других). При этом, если рассматривается связь средней величины результативного показателя y с одним признаком-фактором x , корреляция

называется парной, а если факторных признаков 2 и более (x_1, x_2, \dots, x_m) – множественной [32].

Измерить «тесноту» связи между коррелируемыми величинами – значит определить, насколько вариация результативного признака обусловлена вариацией факторного признака (факторных признаков).

Показатели, с помощью которых можно выявить наличие корреляционной связи между двумя признаками x и y и измерить тесноту этой связи: коэффициент Фехнера, ранговые коэффициенты корреляции Спирмэна и Кендэла, линейный коэффициент корреляции и др.

Наряду с ними существует универсальный показатель – корреляционное отношение (или коэффициент корреляции по Пирсону), применимое ко всем случаям корреляционной зависимости независимо от формы этой связи. Следует различать эмпирическое и теоретическое корреляционное отношение. Эмпирическое корреляционное отношение рассчитывается на основе правила сложения дисперсий как корень квадратный из отношения межгрупповой дисперсии к общей дисперсии, т. е. [32]:

$$\eta_{\text{эмп}} = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma^2}}. \quad (16)$$

Теоретическое корреляционное отношение $\eta_{\text{теор}}$ может быть определено на основе теоретических значений результативного признака \bar{y}_x , рассчитанных по уравнению регрессии. $\eta_{\text{теор}}$ представляет собой относительную величину, получаемую в результате сравнения среднего квадратического отклонения в ряду теоретических значений результативного признака со средним квадратическим отклонением в ряду эмпирических значений. Если обозначить дисперсию эмпирического ряда σ_y^2 , а теоретического ряда – δ^2 , то каждая из них выразится формулами [32]:

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}, \quad \delta^2 = \frac{\sum (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{n}. \quad (17)$$

Сравнивая вторую дисперсию с первой, получим теоретический коэффициент детерминации, который показывает, какую долю в общей дисперсии результативного признака занимает дисперсия, выражающая влияние вариации фактора x на вариацию y

$$\eta_{\text{теор}}^2 = \frac{\delta^2}{\sigma_y^2} = \frac{\sum (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}. \quad (18)$$

Извлекая корень квадратный из коэффициента детерминации, получаем корреляционное отношение [32]:

$$\eta_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma_y^2}} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad 9)$$

Оно может находиться в пределах от 0 до 1, чем ближе его значение к 1, тем теснее связь между вариацией y и x . При $\eta < 0,3$ говорят о малой зависимости между коррелируемыми величинами, при $0,3 < \eta < 0,6$ – о средней, при $0,6 < \eta < 0,8$ – о зависимости выше средней, при $\eta > 0,8$ – о большой, сильной зависимости. Корреляционное отношение применимо как для парной, так и для множественной корреляции независимо от формы связи.

По результатам измерения температуры на Самбургском месторождении общая средняя температура

$$y = \sum y / n = -0,367 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (20)$$

Коэффициент корреляции составит

$$\eta_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma_y^2}} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} = 0,092. \quad (21)$$

Данное значение характеризует малую зависимость изменения температуры от изменения глубины скважин.

По результатам измерения температуры на Агапском лицензионном участке общая средняя температура составила

$$y = \sum y / n = -1,067 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (22)$$

Вычислим коэффициент корреляции:

$$\eta_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma_y^2}} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} = 0,978. \quad (23)$$

По результатам выполненных расчетов выявлена тесная зависимость изменения температуры от изменения глубины скважин, чего не наблюдалось на Самбургском месторождении.

Построенные модели изменения температурных градиентов земли в районах проведения исследований подтверждают неоднородность процессов, что приводит к изменению геопространственных параметров бугров пучения, подтаиванию, выпучиванию, неравномерному нарастанию ледовых образований.

Следует подчеркнуть, что при выполнении комплексных инженерных изысканий для выявления участков распространения многолетнемерзлых пород, установления их границ, выявления таликов, подземной составляющей бугров пучения с внутренним ледяным ядром рекомендуется применять методы геофизиче-

ского обследования. Ввиду важности данных для принятия проектных решений, получаемая информация должна проверяться разными средствами измерения и обрабатываться различными программными продуктами.

Окончательные решения по наличию мерзлотных участков, их координированию целесообразно принимать по данным трех видов исследований: геодезических, геологических и геофизических данных.

Все инженерные изыскания выполняются в границах земельного отвода, которые отражаются в техническом задании на стадии разработки проекта.

Однако по результатам инженерных изысканий, в случае выявления объективных причин (наличие бугров пучения, водных преград и т. п.) возникает необходимость в доотводах земельных участков площадных и линейных объектов.

Полученные модели температурных полей нефтегазового месторождения позволяют выявлять области нестабильности и расположение участков с постоянными низкими температурами. Так, первые две модели на рисунках 33, 34 показывают, что термостабильный участок находится в треугольнике скважин 37-38-30 в направлении на юго-запад. Максимальные деформационные процессы очевидно пройдут на глубинах 10 и более метров в расположении скважин 11-12-13 в северо-восточном направлении. Последние могут вызвать изменения геометрических параметров бугров пучения, их наземной и подземной составляющей.

В алгоритме предрасчета общей величины протаивания и разработанной классификации предложено учитывать не только глубину протаивания под трубопроводом, но и величины сезонного протаивания (пучения), полученные по данным геопространственного мониторинга, обусловленные, в том числе и боковым воздействием бугров пучения на трубопровод ($h_л, h_з$).

Анализ производственных материалов инженерных изысканий по обустройству лицензионных участков на Самбургском нефтегазовом месторождении, а также материалов изысканий Агапского лицензионного участка в Красноярском крае показал, что все задачи по проектированию, строительству со-

оружий не могут быть успешно решены без геопространственного мониторинга бугров пучения.

3.3 Определение величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород

Для проведения пространственного мониторинга бугров пучения в работе приводится способ определения величины и направления деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты (приложение А).

Основными методами получения геопространственных данных являются ГНСС-технологии, электронная тахеометрия, георадарное и геофизическое обследование.

Данный способ относится к области геодезического пространственного мониторинга инженерных сооружений и природных объектов и может быть использован для наблюдений за осадками и деформациями как инженерных сооружений, так и природных объектов (бугров, провалов, холмов, склонов, оползней и т. п.) [69].

В ГОСТ 24846–2012 «Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» приводятся методы измерения вертикальных и горизонтальных перемещений, а также методы измерения наклонов фундаментов зданий и сооружений [26]. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.10.2012 № 599-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 24846–2012 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.07.2013.

Для определения горизонтальных перемещений фундаментов зданий и сооружений ГОСТ 24846–2012 предлагает использовать следующие методы или их комбинации: створные наблюдения, метод отдельных направлений, триангуляция, фотограмметрия [26]. Допускается применять методы трилатерации и полигонометрии.

Наклон фундамента (или здания, сооружения в целом), в соответствии с ГОСТ 24846–2012, следует измерять одним из следующих методов или их комбинированием: проецирования, координирования, измерения углов или направлений, фотограмметрии, механическими способами с применением кренометров, прямых и обратных отвесов [26].

Недостатком этих способов является высокая трудоемкость. Кроме того, данные способы предполагают проведение контроля геометрических параметров в дискретных точках, что не позволяет достоверно оценить геометрические параметры наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты, а значит и определить величину деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты в целом. Данные способы также предполагают наличие человеческого фактора в процессе измерений, что ведет к снижению достоверности и точности [69].

Задачей предлагаемого технического решения является повышение точности и достоверности определения величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты с применением комплекса цифровой аппаратуры, в состав которой входят: электронный тахеометр, ГНСС-аппаратура и цифровая термокоса [69].

Поставленная задача достигается тем, что в способе определения величины и направления деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты, включающем создание плано-высотного обоснования, закрепление точек по периметру бугра пучения, выполнение геодезических измерений, согласно изобретению, выше упомянутые точки по периметру бугра пучения располагают и закрепляют строго по сторонам света – север, запад, юг, восток.

На рисунке 45 представлена предлагаемая схема расположения точек для выполнения геодезических измерений.

На рисунке 46 представлена схема бугра пучения вечной мерзлоты с указанием точек расположения комплекса цифровой аппаратуры.

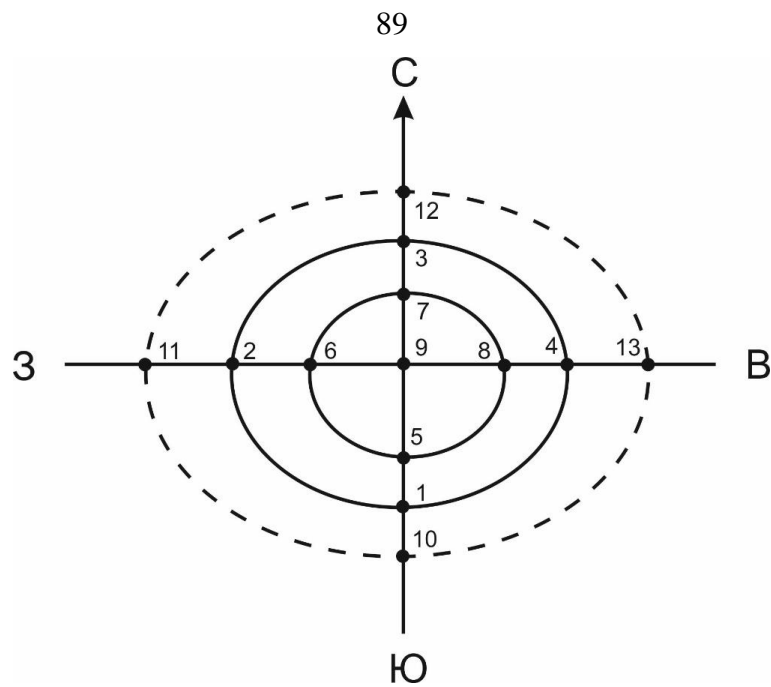


Рисунок 45 – Схема расположения точек для выполнения измерений [69]

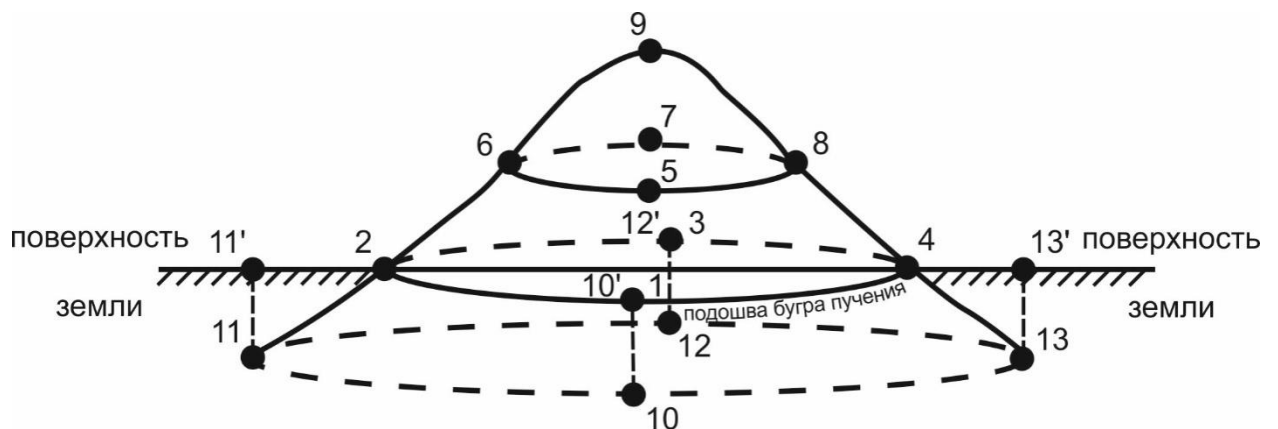


Рисунок 46 – Схема бугра пучения вечной мерзлоты с указанием точек расположения комплекса цифровой аппаратуры [69]

Выполняют бурение скважин, расположенных на вершине бугра пучения, подошве бугра пучения. По закрепленным точкам определяют георадаром примерную границу подземной составляющей бугра пучения. Бурение выполняют до определения точных границ подземной составляющей бугра пучения. Выполняют определение координат X , Y , Z всех закрепленных точек и пробуренных скважин. В пробуренные скважины опускают термокосу и выполняют измерение температуры [69].

Далее выполняют передачу полученной цифровой информации в компьютерную программу и выполняют построение цифровой модели бугра пучения. В этой же программе модель наружного контура бугра пучения совмещают с моделью, построенной по результатам предыдущих измерений наружного контура бугра пучения вечной мерзлоты, и в автоматическом режиме определяют величину деформации и направления наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты.

Предлагаемый способ выполняют следующим образом.

На исследуемом участке создают планово-высотное обоснование. По периметру бугра пучения закрепляют точки, причем строго по сторонам света север, запад, юг, восток (см. рисунок 45, точки 1, 2, 3, 4), определяют координаты X , Y , Z этих точек с помощью ГНСС-аппаратуры [69].

Значение средней квадратической погрешности (СКП) измерения в плане в каждом сеансе наблюдений может быть определено по формуле [24]

$$m_s = \left(m_{\Delta x^2} + m_{\Delta y^2} \right)^{1/2}, \quad (24)$$

где $m_{\Delta x}$ – средняя квадратическая погрешность определения приращения координат по оси X ;

$m_{\Delta y}$ – средняя квадратическая погрешность приращения координат по оси Y в конкретном сеансе наблюдений.

Значение СКП определения высоты в каждом сеансе наблюдений рассчитывается по формуле [24]:

$$m_h = |h_{\text{эт}} - h|, \quad (25)$$

где $h_{\text{эт}}$ – эталонное значение высоты (значение высоты, полученное при калибровке метрологического базиса);

h – измеренное значение высоты в сеансе наблюдений.

Для определения примерных границ подземной составляющей предлагается в направлении север, юг, запад, восток использовать отечественный георадар ОКО-2 (см. рисунки 45, 46, точки 10, 11, 12, 13) [69].

При определении границ распространения подземной составляющей бугра пучения вечной мерзлоты необходимо осуществить бурение скважин с помощью отечественного бурового станка, входящего в состав приборного комплекса. Таким образом, происходит достоверное определение глубины подземной толщи вечной мерзлоты бугра пучения и одновременный контроль данных георадара (при необходимости, количество станций может быть увеличено до восьми, еще четыре – по направлениям юго-запад, северо-запад, северо-восток, юго-восток) [69].

При выполнении геопроостранственного мониторинга больших и средних бугров пучения для определения крутизны скатов формы бугров необходимо определить пространственные координаты в точках, расположенных на средней высоте. Высоту бугра пучения над поверхностью земли и расположение точек предлагается определять электронным тахеометром.

В точке, на вершине бугра пучения и по границе подземной составляющей предлагается пробурить вертикальную скважину для определения наличия многолетнемерзлых пород и расположения в ней термокосы. Последняя позволяет выполнить измерения температуры внутри бугра пучения и ее зависимости от глубины, выполнить сравнение с наружными показаниями. Полученные геопроостранственные данные позволят построить 3D-модель бугра пучения наземной и подземной составляющих [69].

Измерения предлагается выполнять четыре раза в год; в летний, зимний, осенний и весенний периоды. Показания термокосы в совокупности с результатами геодезических, геологических, георадарных данных позволят осуществить прогноз жизненного цикла бугра пучения (построение продольных профилей по заданным направлениям, рост бугра, подтаивание, образование таликов и т. п.). Все данные должны быть сведены в единый программный комплекс для обработки цифровых данных и создания единой базы данных. Это необходимо для обеспечения безопас-

ного размещения коридора линейных коммуникаций и инженерных сооружений при обустройстве нефтегазовых месторождений в районах Крайнего Севера.

В случае, когда съемку бугра пучения для его пространственного мониторинга невозможно выполнить с использованием ГНСС-наблюдений, измерения выполняются с применением электронного тахеометра методом свободной станции, рисунок 47 [69].

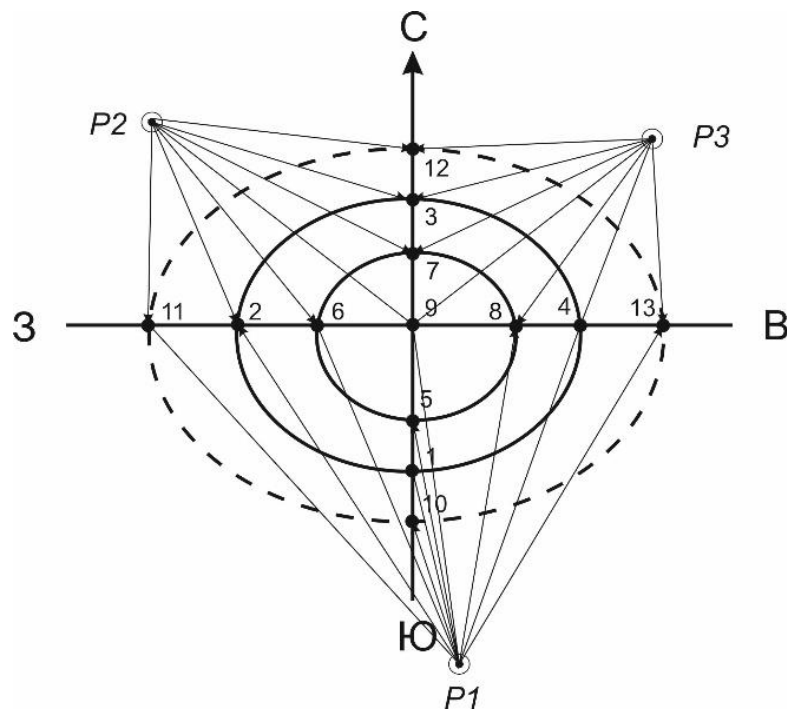


Рисунок 47 – Схема выполнения измерений электронным тахеометром [69]

Координаты каждой съемочной станции определяются ГНСС-методом, а в качестве связующих используются точки, определенные при проведении рекогносцировки. Для контроля определения координат выполняются избыточные измерения. ГНСС-наблюдения выполняются статическими методами, хотя иногда можно применять и кинематические. Это зависит от требуемой точности определения координат, времени, типа приемника, транспортных средств и наличием путей перемещения между определяемыми точками [2, 3, 34, 69].

В случае, если с точки свободной станции есть прямая видимость на два и более пункта геодезической сети, координаты станций определяются из обрат-

ной линейно-угловой засечки или обратной угловой засечки, режим обратной засечки предусмотрен во всех современных моделях электронных тахеометров, также из засечки выполняется определение отметки станции.

Точность определения координат из обратной засечки зависит от геометрии построения. Исходные точки должны находиться на достаточном отдалении друг от друга, горизонтальный угол между направлениями на исходные точки должен иметь допустимое значение.

После производства геодезических измерений на исходные пункты выполняется тахеометрическая съемка как самого бугра пучения, так и вероятного района его распространения. Одновременно производится определение высоты поверхности бугра пучения [69].

3.4 Исследование светодиодной насадки на отражатель электронного тахеометра для повышения производительности труда инженерно-геодезических изысканий в районах Крайнего Севера

подавляющее большинство нефтегазовых месторождений, освоение и разработка которых ведутся в РФ в настоящее время, расположены в районах Крайнего Севера или за полярным кругом. Для этих районов характерны полярная ночь и неблагоприятные условия для производства геодезических измерений.

При проведении различных видов работ инженерам-геодезистам все чаще приходится выполнять измерения в темное время суток, а также в тоннелях, шахтах и т. п. [57, 68].

Измерения в условиях частичной или полной темноте требуют дополнительных технических средств, оборудования и помощников, что приводит к дополнительным материальным затратам. Особенно трудоемкой при проведении измерений становится операция наведения прибора на цель.

Нередко возникает ситуация, когда в полевых условиях не удастся завершить процесс измерений в светлое время суток, и производительность труда зависит

от длины светового дня и условий видимости. Различные приборостроительные предприятия изготавливают отражатели с импульсной подсветкой.

Анализ существующего оборудования показал, что основными недостатками приведенных отражателей с импульсной подсветкой является их стоимость (от 6 000 до 8 000 рублей) и необходимость приобретать новое оборудование взамен существующего.

Для решения этой проблемы была разработана съемная светодиодная насадка, которая помещается непосредственно на отражатель и не требует приобретения нового геодезического оборудования (приложение Б).

Светодиодная съемная насадка на отражатель предназначена для использования при выполнении полевых инженерно-геодезических работ при любых условиях освещенности (рисунок 48).

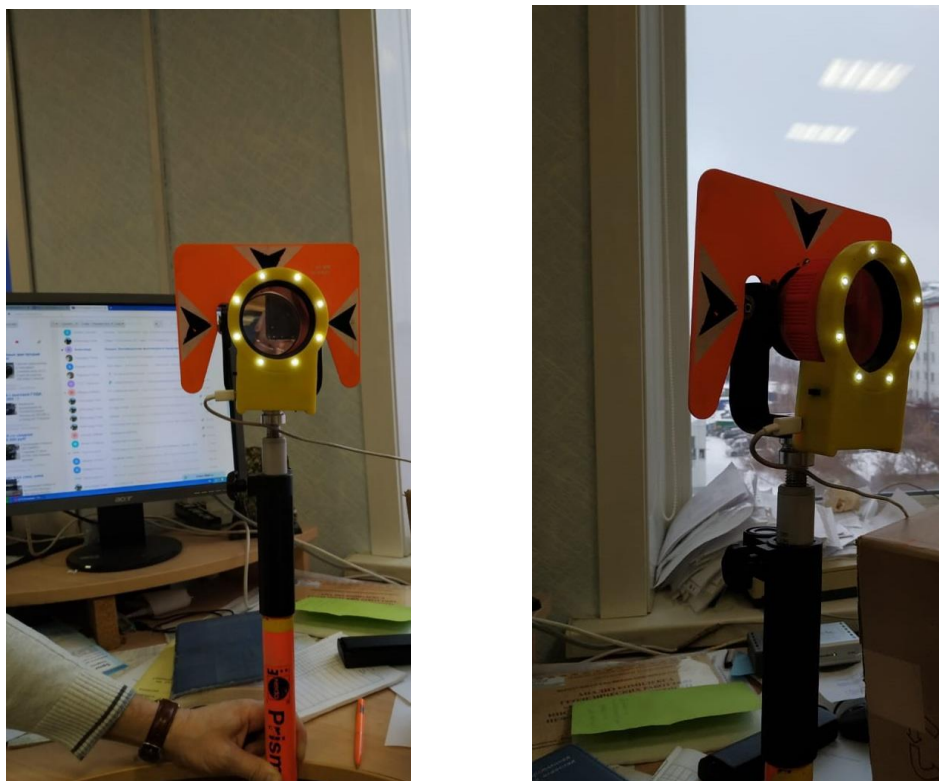


Рисунок 48 – Внешний вид светодиодной съемной насадки в рабочем состоянии

Корпус насадки выполнен из цветного пластика на 3D-принтере полым, в него помещаются источники излучения и источник питания, а также трехкон-

тактный переключатель, позволяющий работать насадке в импульсном режиме и режиме постоянного свечения, Источником питания для насадки на отражатель служит аккумулятор типоразмера «18650» или алкалиновые батарейки «AAA» [57, 68].

Зарядка аккумулятора осуществляется через стандартный micro-USB разъем (рисунок 49).



Рисунок 49 – Светодиодная съемная насадка в режиме зарядки аккумулятора [57, 68]

Для определения качества работы насадки проведены измерения в темное время суток, на различные расстояния и при различных режимах работы насадки (рисунок 50).

Во время производства измерений оценивались время наведения на цель и визуальные ощущения наблюдателя. В качестве источника света использовалась подсветка телефоном, постоянная и импульсная подсветка светодиодной насадкой собственного изготовления. Результаты измерения времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 129,216 м приведены в таблице 9 [57, 68].

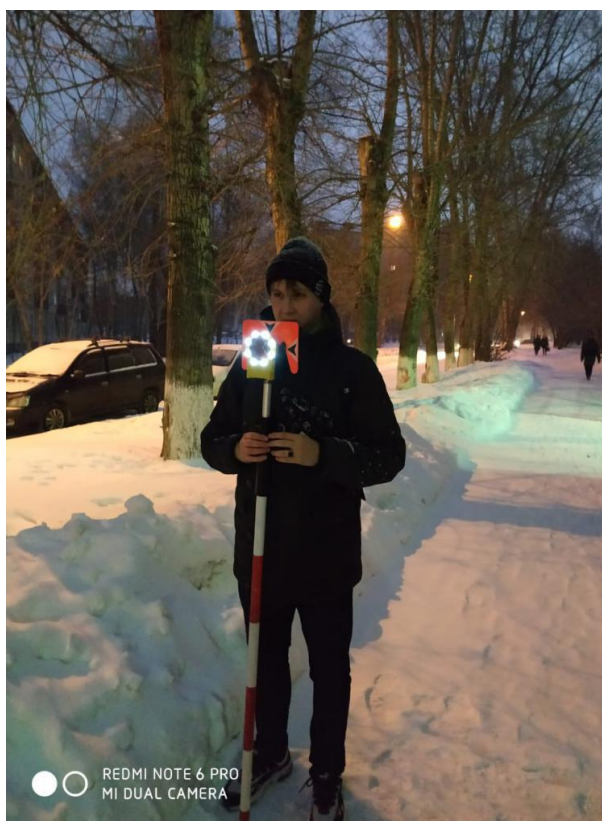


Рисунок 50 – Исследование эффективности светодиодной съемной насадки на отражатель при измерении расстояний

Таблица 9

№ приема	Время наведения без подсветки (в секундах)	Время наведения с подсветкой отражателя телефоном (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме постоянного свечения (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме импульсной подсветки (в секундах)
1	18,91	10,03	20,78	22,00
2	20,08	17,35	18,00	28,94
3	28,18	10,00	16,03	16,65
4	37,72	12,38	18,33	8,67
5	51,27	12,54	17,56	15,72
6	62,77	11,87	11,81	18,17
7	74,24	8,33	13,89	13,61
8	85,08	13,09	10,66	15,21
9	94,72	12,32	9,61	7,19
10	105,90	10,79	14,65	11,03
Среднее время (в секундах)	56,89	11,87	15,13	15,72

На графике, приведенном на рисунке 51, показано изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 129,216 м.

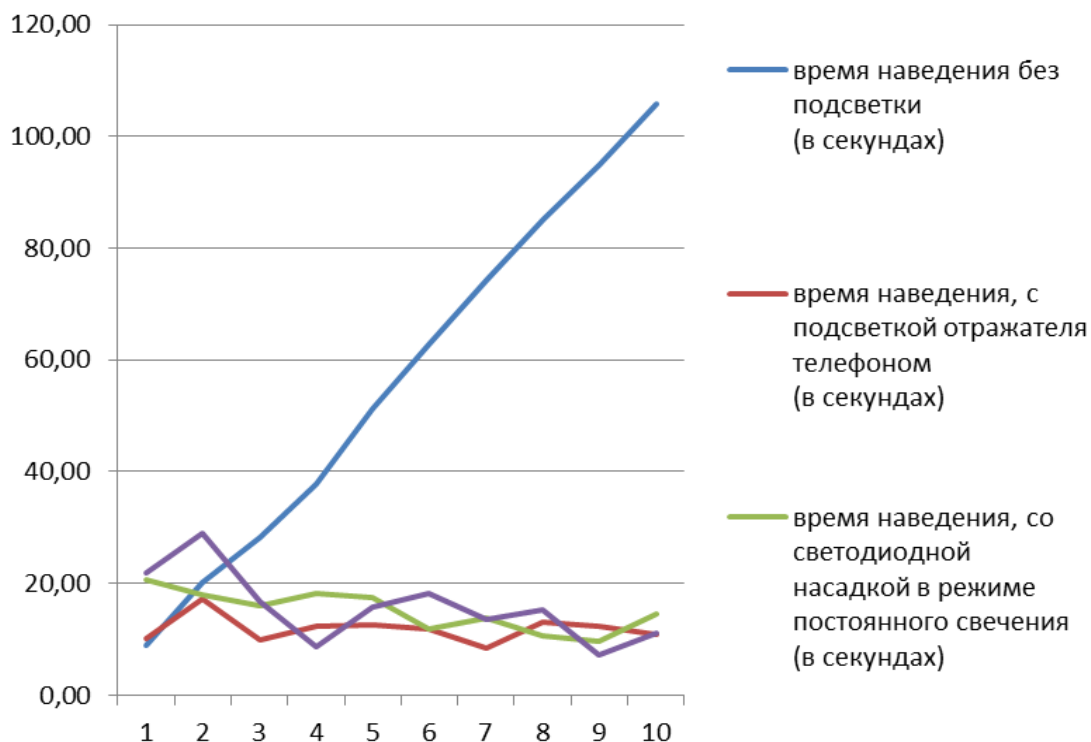


Рисунок 51 – Изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 129,216 м

На расстоянии 294,471 м и более дальнее выполнение измерений без подсветки, при наблюдениях в темное время суток, не представляется возможным ввиду того, что затруднено наведение прибора на цель. Результаты измерения времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 294,471 м приведены в таблице 10 [57, 68].

На графике, приведенном на рисунке 52, показано изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 294,471 м [57, 68].

Результаты измерения времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 482,535 м приведены в таблице 11 [57, 68].

Таблица 10

№ приема	Время наведения без подсветки (в секундах)	Время наведения с подсветкой отражателя телефоном (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме постоянного свечения (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме импульсной подсветки (в секундах)
1		12,95	10,26	10,87
2		21,00	15,23	11,15
3		23,86	11,68	10,51
4		16,28	7,51	11,38
5		21,89	12,99	7,80
6		18,51	12,02	12,20
7		18,21	6,88	9,71
8		14,83	7,96	7,41
9		10,70	13,19	8,13
10		14,06	8,47	16,34
11		12,02	9,65	9,59
Среднее время (в секундах)		16,76	10,53	10,46

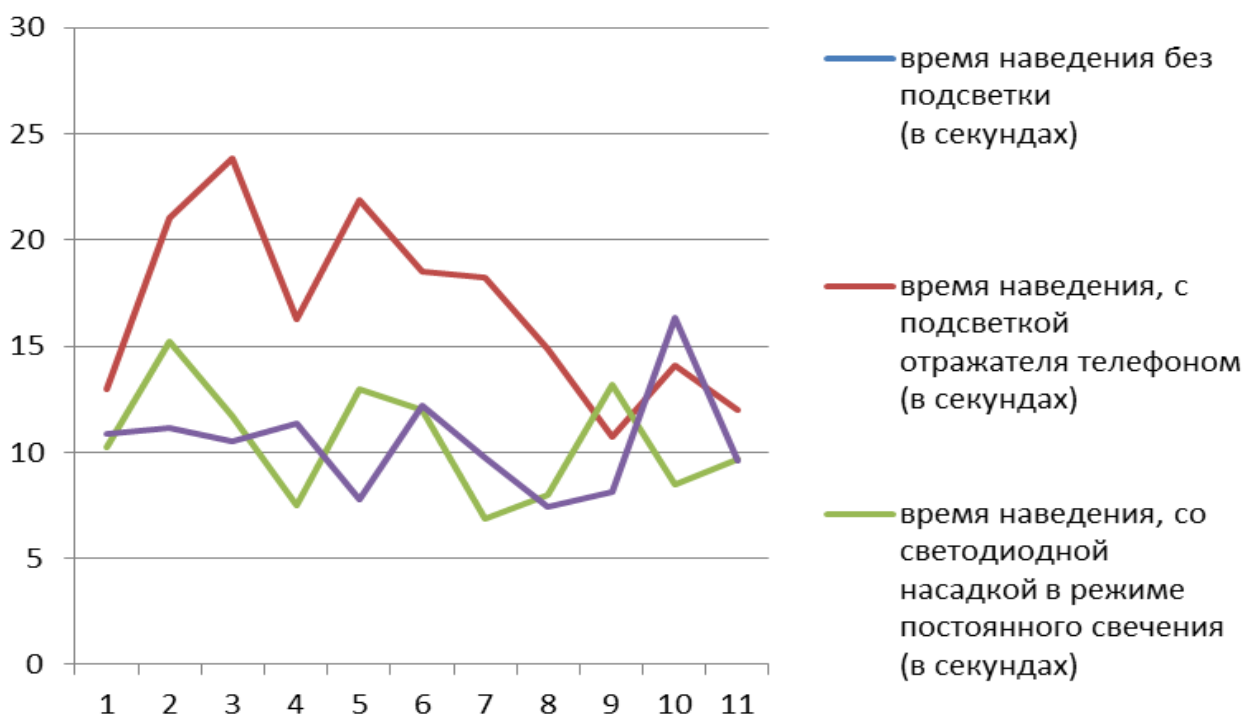


Рисунок 52 – Изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 294,471 м

Таблица 11

№ приема	Время наведения без подсветки (в секундах)	Время наведения с подсветкой отражателя телефоном (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме постоянного свечения (в секундах)	Время наведения со светодиодной насадкой в режиме импульсной подсветки (в секундах)
1		19,99	21,19	12,52
2		30,29	12,78	15,40
3		39,46	13,09	14,44
4		47,31	37,17	12,75
5		57,41	21,81	24,80
6		68,69	11,58	11,09
7		76,59	10,02	16,78
8		84,81	10,82	18,14
9		95,70	9,56	11,67
10		105,00	14,74	12,34
11		105,30	9,88	13,31
Среднее время (в секундах)		66,41	14,79	14,11

На графике, приведенном на рисунке 53, показано изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 482,535 м [57, 68].

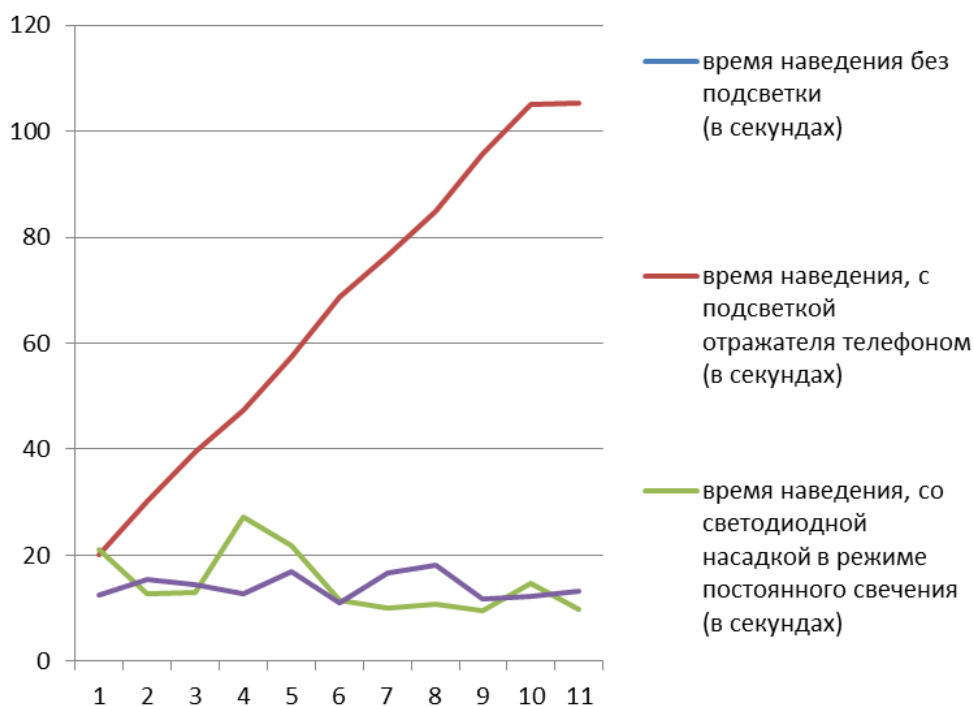


Рисунок 53 – Изменение времени наведения тахеометра на отражатель на расстоянии 482,535 м

Исследования подтверждают, что съёмная светодиодная насадка на отражатель удобна в обращении, легко может быть использована при выполнении полевых работ, при любых условиях освещенности. Съёмная светодиодная насадка позволяет сократить время наведения на цель, а при измерениях больших расстояний и работе насадки в импульсном режиме позволяет выделить отражатель среди других источников света [57, 68].

При выполнении геодезических измерений электронным тахеометром на отражатель с одной призмой на расстояние 129,216 м производительность труда, относительно измерений без подсветки, увеличилась:

- при подсветке телефоном – в 5 раз;
- с применением светодиодной насадки в режиме постоянного свечения – в 4 раза;
- с применением светодиодной насадки в режиме импульсного свечения – в 4 раза.

При выполнении геодезических измерений электронным тахеометром на отражатель с одной призмой на расстояние 294,471 м производительность труда, относительно измерений с подсветкой отражателя телефоном, увеличилась [57, 68]:

- с применением светодиодной насадки в режиме постоянного свечения – в 2 раза;
- с применением светодиодной насадки в режиме импульсного свечения – в 2 раза.

При выполнении геодезических измерений электронным тахеометром на отражатель с одной призмой на расстояние 482,535 м производительность труда, относительно измерений с подсветкой отражателя телефоном, увеличилась:

- с применением светодиодной насадки в режиме постоянного свечения – в 4 раза;
- с применением светодиодной насадки в режиме импульсного свечения – в 5 раза.

Достоинствами насадки являются сравнительно невысокая стоимость, в 4–5 раз ниже стоимости специальных отражателей, и длительное время работы без дополнительной зарядки даже при низких температурах.

Изделие герметично, слабо подвержено влиянию температурных перепадов, устойчиво к воздействию влаги, дождя, снега, тумана. Светодиоды, расположенные в нижней части насадки, позволяют определить уровень зарядки аккумулятора. При использовании светодиодной съемной насадки инженер-геодезист, выполняющий измерения электронным тахеометром, в 2–3 раза быстрее производит наведение на визирную цель, а при измерениях больших расстояний и работе насадки в импульсном режиме позволяет выделить отражатель среди других источников света. Недостатком насадки является то, что при измерениях на малые расстояния использование импульсного режима затрудняет точное выполнение наведения на цель из-за мигания светодиодов, что может повлиять на измерение углов [57, 68].

Главным преимуществом насадки является то, что она не требует замены отражателя на второй специально изготовленный, а используется совместно со стандартным. Стоимость изделия в 3–4 раза меньше, чем специально изготавливаемый отражатель для производства измерений при недостаточной освещенности или полном ее отсутствии (например, в помещении или в тоннеле) и при отсутствии видимости.

Таким образом, насадка светодиодная съемная на отражатель электронного тахеометра повышает производительность труда инженера-геодезиста на 50 % и более за счет сокращения времени обнаружения визирной цели и ввода ее в биссектор. Результаты исследований подтверждаются геодезическими измерениями, с прототипом светодиодной съемной насадкой на отражатель электронного тахеометра, выполненными специалистами СургутНИПИнефть в полевых условиях [57, 68].

3.5 Методика геодезического обеспечения геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород

Геодезический пространственный мониторинг многолетнемерзлых форм рельефа должен стать составной частью мониторинга окружающей среды, включающего несколько десятков тематических мониторингов, таких как мониторинг климата, наземных экосистем, качества воды, загрязнения атмосферы, продуктов питания, возобновляемых земных ресурсов, здоровья людей, движений земной поверхности и др. [9].

Комплексный мониторинг является одним из наиболее сложных направлений мониторинга. При его осуществлении необходимо интегрировать геодезические данные с данными геологических, геофизических наблюдений, наблюдений за динамикой изменений наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород [7].

В настоящее время существует большое количество разнообразных и в то же время разрозненных методов определения величины и направления деформаций наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород.

Среди методов определения состояния, а также величины подземной составляющей выделяются такие методы, как метод георадиолокации, гравиметрический метод, методы исследования динамики развития бугров пучения с использованием метеоданных и метод термометрии.

Метод георадиолокации позволяет определять ММП в состоянии повышенной внутренней температуры, которые не всегда выявляются при изучении разреза скважины.

Применение георадара оказывается весьма удачным при изучении бугров пучения, не выраженных в рельефе, и при оконтуривании участков с развитием термокарста. Получаемая информация о внутренней структуре объектов при этом оказывается существенно более полной по сравнению с ландшафтным инженерно-геокриологическим картированием. Георадар хорошо зарекомендовал себя

в линейных и особенно площадных изысканиях, при стратификации отложений на дне рек и озер, при определении границ вечной мерзлоты.

Однако, чтобы получить информацию о свойствах пород или чтобы различить несколько тонких слоев, необходимо получить высокое разрешение. Среди прочих недостатков выделим достаточно высокую стоимость и плохую «читаемость» радарограмм в условиях сложных грунтов и при наличии помех над определяемым объектом.

Результаты гравиметрического мониторинга указывают на эффективность использования высокоточных гравиметрических наблюдений для контроля разработки залежи и уровня подъема ГВК на газовых месторождениях. К сожалению, этой технологии недостаточно для полноценного контроля многолетнемерзлых пород, так как в результате строится модель только подземной части бугра пучения, а не полная модель.

Материалы метеонаблюдений показывают, что многолетнее пучение происходило на фоне уменьшения суровости климата и резких изменений количества атмосферных осадков, на фоне потепления климата в отдельные годы могут складываться весьма благоприятные для пучения климатические условия, но вместе с этим материалы метеонаблюдений не показывают реальной картины величины и направления деформации подземной составляющей бугров пучения.

Среди методов, с помощью которых можно определить величину наружной составляющей, выделяются такие методы, как нивелирование, ГНСС-съемка, тахеометрическая съемка, лазерное сканирование, фотограмметрическая аэрофото-съемка БПЛА, спутниковое зондирование [39].

Несмотря на доступность, нивелирование поверхности позволяет получить только высотную составляющую, что явно недостаточно для полноценного геопространственного мониторинга величины и направления деформации бугров и площадей пучения.

При всей своей привлекательности ГНСС-технологии имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение в задачах мониторинга [1].

Прежде всего, это падение точности из-за уменьшения числа спутников или из-за их неблагоприятного расположения относительно наблюдателя. Уменьшение количества доступных спутников чаще всего происходит из-за блокирования сигналов различными препятствиями. В некоторых случаях может происходить потеря захвата из-за ионосферных возмущений. Также для увеличения точности возникает необходимость объединения спутниковых приемников с другими видами аппаратуры, такими как инерциальные системы, псевдоспутники и пр. [2, 3, 4].

Одним из основных минусов лазерного сканирования по сравнению с топографической съемкой тахеометром является съемка «существующей поверхности», не всегда совпадающей с реальной поверхностью рельефа, что особенно важно при проведении измерений в условиях Крайнего Севера.

Аэрофотосъемка БПЛА осуществляется путем сплошного фотографирования земной поверхности с беспилотного летательного аппарата и дальнейшей фотограмметрической обработки массива полученных снимков на основе стереоэффекта перекрывающихся снимков. Однако масштабы крупнее 1 : 2 000 при сложной местности нуждаются в уточнении наземными способами съемки. Необходимо также учесть, что аэросъемочные работы можно производить лишь при благоприятных метеорологических условиях и освещенности.

Несмотря на наличие значительного количества разработанных методик и технологических решений для проведения исследований многолетнемерзлых бугров пучения, их главным недостатком является то, что они не предполагают геопространственного мониторинга многолетнемерзлых форм рельефа. Поэтому важной задачей является разработка методики и технологических решений для геодезического мониторинга наружной и подземной составляющей многолетнемерзлых пород, для цели прогнозирования динамики развития или деградации бугров пучения, а также влияния этих процессов на объекты инфраструктуры нефтегазовых месторождений.

В связи с этим разработана методика геопространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих бугров пучения, в которой различные методы и технологии дополняют друг друга в едином технологическом процессе.

На первом этапе производства работ по геопространственному мониторингу выполняется рекогносцировка бугров пучения с определением типа объекта исследования. Также на этом этапе работ создается опорная геодезическая сеть с помощью спутниковых приемников (ГНСС-технологии), с привязкой вновь создаваемых геодезических пунктов к пунктам государственной геодезической сети.

К построению пунктов опорной геодезической сети, выбранных на первом этапе с применением ГНСС-технологий (пять пунктов плюс один пункт по высоте), считаем, целесообразно добавить закладку репера на выявленном термостабилизированном участке с целью последующего использования для геопространственного мониторинга бугра пучения, то есть опорная геодезическая сеть должна состоять из сети не менее чем шести пунктов. Вариант создания подобной опорной геодезической сети показан на рисунке 54. Точность построения опорной геодезической сети регламентируется СП 11-104–97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» и ГКИНП (ОНТА)-02-262–02 «Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС И GPS» [24].

Если в зоне действия расположены постоянно-действующие спутниковые станции, то измерения выполняют от них, принимая в качестве исходных пунктов.

Вариант создания подобной опорной геодезической сети показан на рисунке 54.

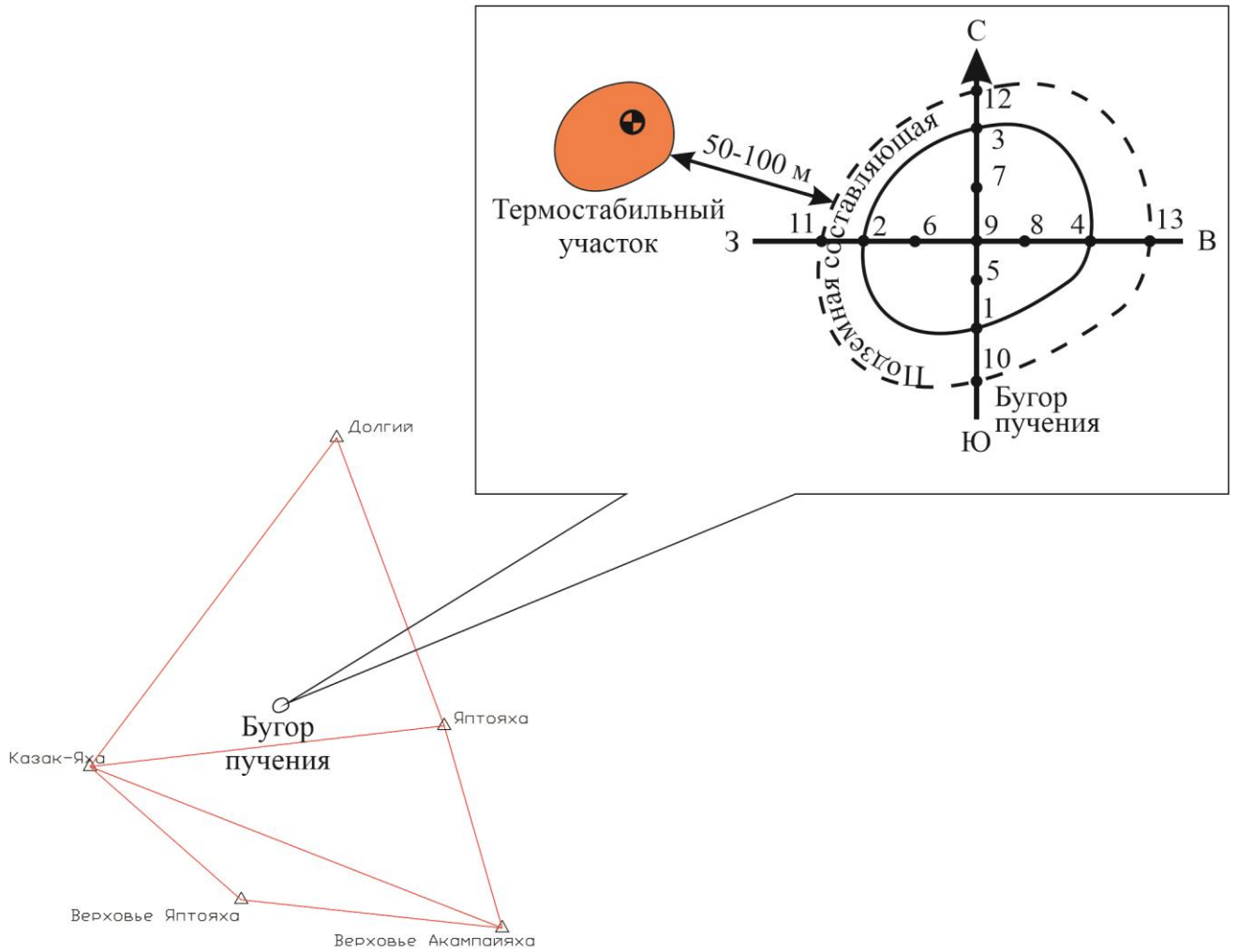


Рисунок 54 – Вариант создания опорной геодезической сети

Точность создания полной 3D-модели бугра пучения определяется:

- СКП геодезических работ на поверхности земли;
- СКП определения координат границ подземной составляющей бугра пучения.

Точности создания 3D-модели решались с учетом алгоритма, представленного в монографии Хлебниковой Т. А. «Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен» [30].

СКП построения полной модели бугра пучения может быть определена по формулам

$$m_{\text{пмбп}} = \sqrt{m_{\text{псбп}}^2 + m_{\text{нсбп}}^2}, \quad (26)$$

$$m_{\text{нсбп}} = \sqrt{m_{\text{погс}}^2 + m_{\text{пшпс}}^2 + m_{\text{впнс}}^2}, \quad (27)$$

$$m_{\text{псбп}} = \sqrt{m_{\text{пшпс}}^2 + m_{\text{впнс}}^2 + m_{\text{терм}}^2}, \quad (28)$$

где $m_{\text{нсбп}}$ – СКП подземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород;

$m_{\text{нсбп}}$ – СКП наземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород;

$m_{\text{погс}}$ – СКП построения опорной геодезической сети;

$m_{\text{пшпс}}$ – СКП планового положения наземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород;

$m_{\text{впнс}}$ – СКП высотного положения наземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород;

$m_{\text{пшпс}}$ – СКП планового положения подземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород;

$m_{\text{впнс}}$ – СКП высотного положения подземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород, зависит от характеристик прибора георадиолокации и указана в паспорте (Георадар «ОКО-3» Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений расстояний от 0,35 до 0,15 м в зависимости от антенного блока);

$m_{\text{терм}}$ – СКП термометрии, зависит от точности разбивки скважин, определения глубины скважины при бурении и характеристик термокосы (МЦДТ 0922 – многозонный цифровой датчик температуры. Пределы допускаемой абсолютной погрешности от –50 до +100 °С, не более 0,5).

СКП подземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород составила

$$m_{\text{нсбп}} = \sqrt{20^2 + 20^2 + 10^2} = 30 \text{ см.} \quad (29)$$

СКП наземной составляющей бугра пучения многолетнемерзлых пород составила

$$m_{\text{нсбп}} = \sqrt{2^2 + 1,3^2 + 2^2} = 3,11 \text{ см.} \quad (30)$$

СКП полной 3D-модели бугра пучения составила

$$m_{\text{пмбп}} = \sqrt{30^2 + 3,11^2} = 30,05 \text{ см.} \quad (31)$$

Принимаем, что погрешности, перечисленные в правых частях формул (26)–(28), имеют незначительные корреляционные связи.

Первый этап производства работ по геопространственному мониторингу бугров пучения многолетнемерзлых пород показан на рисунке 55.

На втором, основном, этапе выполняют определение величины и направления деформаций наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород. Для этого предлагается производить бурение скважин, расположенных на вершине бугра пучения, подошве бугра пучения, по закрепленным точкам. Определяют георадаром границу подземной составляющей бугра пучения, производят бурение в этих точках, бурение выполняют до определения точных границ подземной составляющей бугра пучения. Выполняют определение координат X , Y , всех закрепленных точек и пробуренных скважин, опускают в пробуренные скважины термокосу и производят измерение температуры, передают полученную цифровую информацию в программный комплекс, создают цифровую модель бугра пучения, в этом же программном обеспечении модель наружного контура бугра пучения совмещают с моделью, построенной по результатам предыдущих измерений наружного контура бугра пучения вечной мерзлоты, в автоматическом режиме определяют величину деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты [74], рисунок 56.

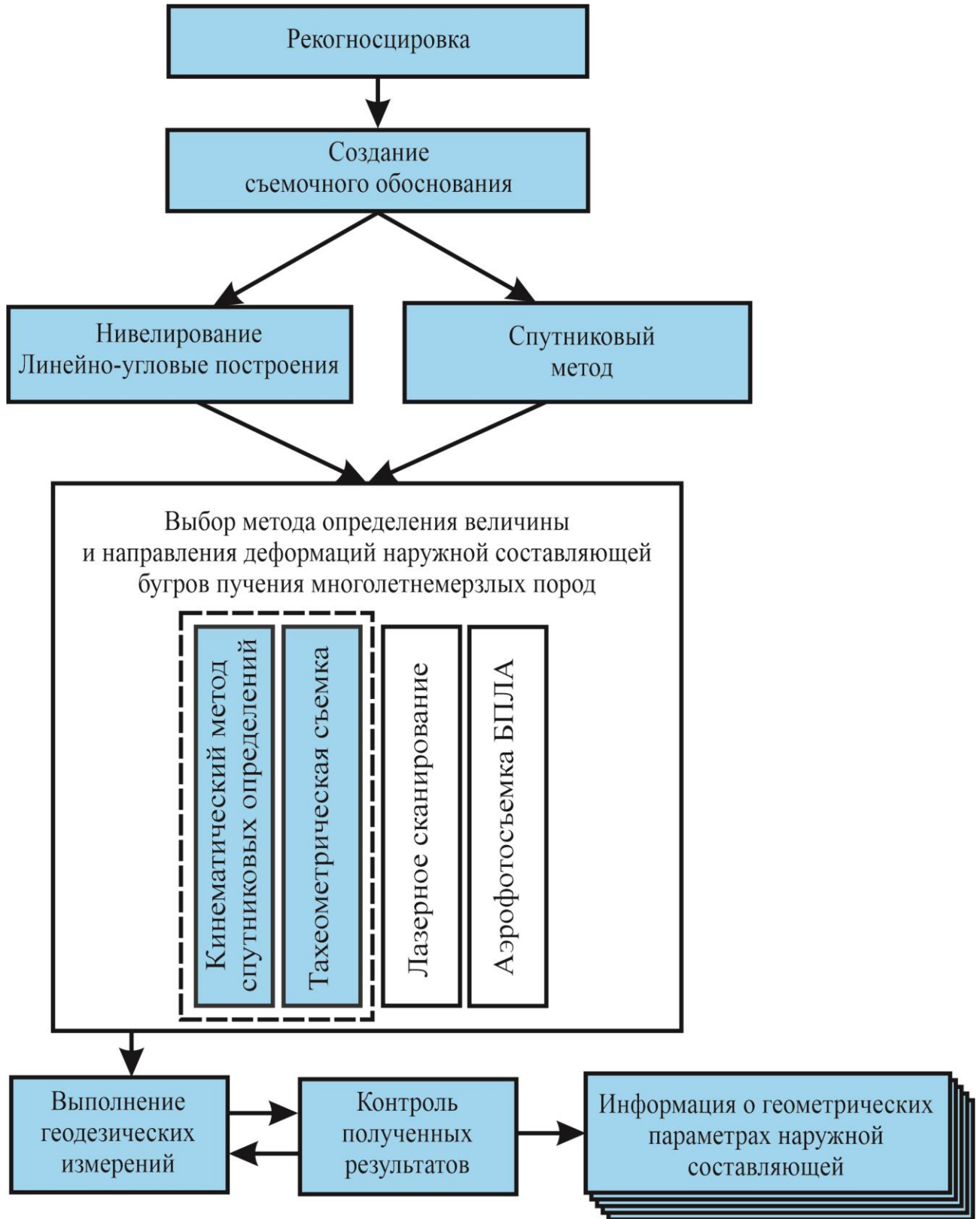


Рисунок 55 – Методика геодезического обеспечения определения величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород

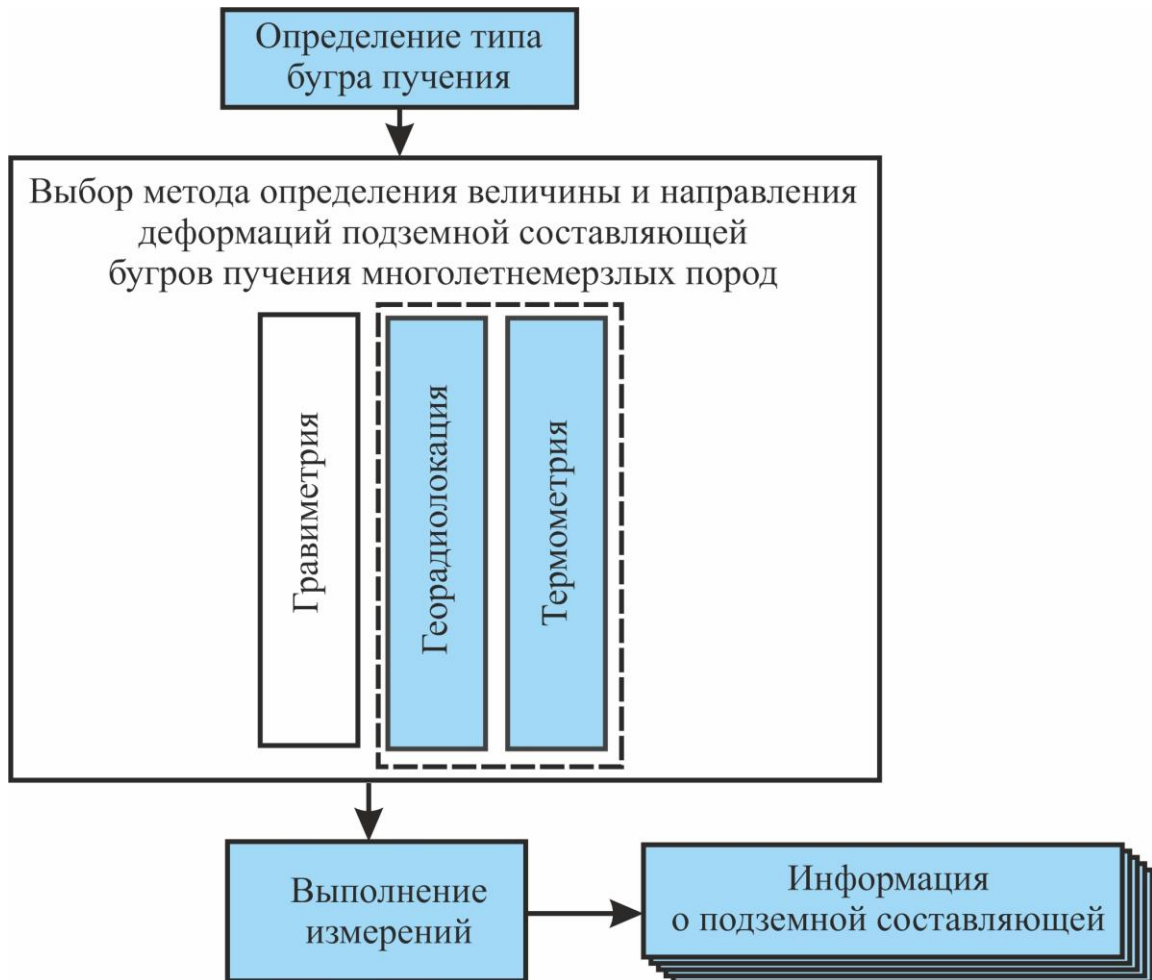


Рисунок 56 – Определение величины и направления деформаций подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород

Для оптимизации процесса производства измерений возможно применение «Устройства для транспортировки геодезического, георадарного, геологического оборудования и выполнения геодезических, георадарных и геологических работ», описанного в патенте РФ на полезную модель № 164037 от 01.08.2016 [67].

На заключительных этапах выполнения работ по геопространственному мониторингу бугров пучения дается прогноз динамики развития бугров пучения ММП, а также определение типа и прогноз деформации линейных сооружений от влияния развития или деградации бугров пучения ММП.

Методика определения величины и направления деформаций бугров пучения многолетнемерзлых пород приведена на рисунке 57.

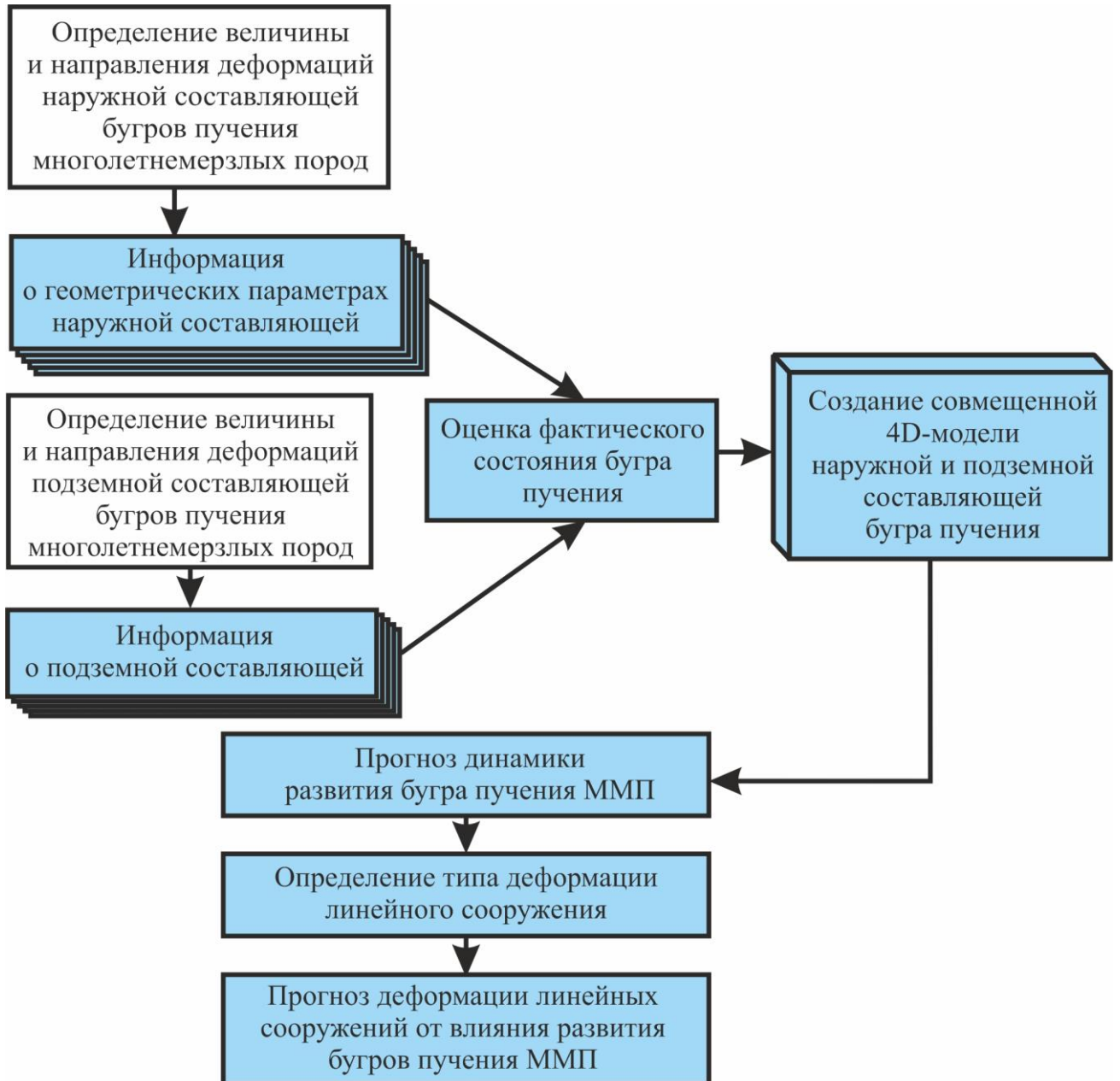


Рисунок 57 – Методика геопространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих бугров пучения многолетнемерзлых пород

При выполнении инженерных изысканий для обустройства нефтегазовых месторождений следует особое внимание уделять определению границ наземной и подземной составляющих миграционных бугров пучения с ядром из многолетнемерзлых пород.

Геопространственное положение трубопровода и его взаимодействие с влиянием миграционных бугров пучения изучено недостаточно хорошо, но разработанная методика позволяет на этапе инженерных изысканий осуществлять прогнозирование деформационных процессов. Объединенная схема геопространственного мониторинга бугров пучения приведена в приложении В.

Выводы по третьему разделу

В результате выполненных исследований установлено, что действующая нормативно-техническая документация по выполнению инженерных изысканий для геопространственного мониторинга многолетнемерзлых форм рельефа и производства инженерно-геодезических изысканий линейных сооружений на территориях распространения бугров и площадей пучения не в полном объеме отражает информацию, а зачастую такая документация полностью отсутствует. В связи с этим документация требует доработки в части терминологии, применения современных средств измерений и использования новейших программных продуктов для обработки полевых измерений.

Возникает необходимость в разработке новых и совершенствовании старых методических и технологических решений при выполнении инженерно-геодезических изысканий линейных сооружений на территориях распространения многолетнемерзлых форм рельефа.

Это позволит с максимально возможной точностью определять деформационные процессы, происходящие в геометрических параметрах бугров пучения, и прогнозировать негативные воздействия на линейные и площадные инженерные сооружения для обеспечения их безаварийной эксплуатации с увеличением срока службы и сохранением устойчивого экологического развития территории.

Разработанная методика геодезического обеспечения позволяет оптимизировать инженерно-геодезические работы при проведении геопространственного мониторинга бугров и площадей пучения, а также использовать полученные данные при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений на территориях распространения многолетнемерзлых форм рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований достигнута цель и решены поставленные задачи.

Основные научные и практические результаты, полученные в ходе исследований, заключаются в следующем:

– в результате анализа отечественного и зарубежного опыта исследований многолетнемерзлых пород установлено, что вопрос геопространственного мониторинга бугров и площадей пучения рассматривался без учета возможностей построения полной 3D-модели;

– разработанная классификация бугров пучения вечной мерзлоты с учетом стадий развития, механизмов образования и геометрических параметров позволяет подобрать методику геодезического мониторинга и, совместно с разработанной классификацией деформаций трубопроводов, принимать технологические решения по повышению уровня безопасности и увеличению сроков их эксплуатации;

– разработанный алгоритм оценки бокового воздействия бугров пучения сплошного и прерывистого распространения на трубопровод способствует принятию оптимальных решений для размещения площадных и линейных объектов нефтегазовых комплексов на этапе предпроектной подготовки;

– разработан способ определения величины и направления деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты для геопространственного мониторинга бугров и площадей пучения, получен патент РФ на изобретение № 2712796, позволяющий выявлять области нестабильности и осуществлять прогноз развития деформационных процессов;

– разработанная методика геопространственного мониторинга бугров пучения внедрена в производство и доказала свою эффективность при выполнении инженерных изысканий на Агапском, Олимпийском лицензионных участках и на Самбургском нефтегазовом месторождении;

– предложено технологическое решение по изготовлению и эффективному применению съемной светодиодной насадки на отражатель электронного тахеометра, получен патент РФ на полезную модель № 200746, что позволяет повысить производительность труда в 2 раза за счет сокращения времени обнаружения визирной цели при выполнении измерений в условиях недостаточной освещенности.

Результаты диссертационного исследования успешно использовались при проведении изысканий специалистами СургутНИПИнефть.

Разработанные методические и технологические решения позволяют повысить эффективность инженерно-геодезических работ при проведении геопространственного мониторинга бугров и площадей пучения, а также использовать полученные данные при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений на территориях распространения многолетнемерзлых форм рельефа.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в рамках выполнения Государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2025 года», которая утверждена постановлением Правительства от 30.03.2021 № 484.

Перспектива дальнейших научных исследований направлена на разработку и внедрение технологических решений для успешного освоения Арктики и Арктического шельфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Антонович, К. М. Геодезический контроль линейной части магистральных трубопроводов с использованием спутниковых технологий / К. М. Антонович, А. М. Олейник, Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 1. – С. 62–66.

2 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1 : монография / К. М. Антонович. – Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с. – Текст : непосредственный.

3 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2 : монография / К. М. Антонович. – Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с. – Текст : непосредственный.

4 Антонович, К. М. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения / К. М. Антонович, А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 6/1. – С. 123–135.

5 Бердников, Н. М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым / Н. М. Бердников. – Текст : непосредственный // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 3. – С. 81–86.

6 Биндер, И. О. Инженерно-геодезические изыскания для комплексной оценки природных и техногенных условий территории строительства / И. О. Биндер, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 11. – С. 6–9.

7 Биндер, И. О. Инженерно-геодезические изыскания линейного участка магистрального газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» / И. О. Биндер. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2014. – № 5-6. – С. 64–67.

8 Биндер, И. О. Об учете погрешностей геодезического обеспечения при строительстве, мониторинге и предрасчетах деформаций трубопроводов /

И. О. Биндер, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № 6. – С. 13–16.

9 Биндер, И. О. Особенности инженерно-геодезических изысканий линейного участка магистрального газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» / И. О. Биндер, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 1. – С. 49–53.

10 Большаков, В. Д. Геодезия. Изыскания и проектирование инженерных сооружений : справочное пособие / В. Д. Большаков, Е. Е. Ключин, И. Ю. Васютинский. – Москва : Недра, 1991. – 238 с. – Текст : непосредственный.

11 Бородавкин, П. Я. Сооружение магистральных трубопроводов / П. Я. Бородавкин, В. Л. Березин. – Москва : Недра, 1977. – 73 с. – Текст : непосредственный.

12 Быков Л. И. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов / Л. И. Быков. – Санкт-Петербург : Недра, 2006. – 805 с. – Текст : непосредственный.

13 Васильчук, Ю. К. Миграционные бугры пучения в заполярной части криолитозоны Средней Сибири / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Т. Ю. Репкина. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2013. – № 2. – С. 28–45.

14 Васильчук, Ю. К. Об особенностях формирования бугров пучения на севере Западной Сибири в голоцене. Природные условия Западной Сибири / Ю. К. Васильчук. – Москва : Изд-во Московского университета, 1983. – С. 88–103. – Текст : непосредственный.

15 Васильчук, Ю. К. Особенности инженерных изысканий для строительства трубопроводов в пределах бугристых ландшафтов зоны спорадического распространения многолетнемерзлых пород / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2014. – № 9-10. – С. 4–12.

16 ВСН 014–89. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. – Москва : Миннефтегазстрой, 1990. – Текст : непосредственный.

17 ВСН 30–81. Инструкция по установке и сдаче заказчику закрепительных знаков и реперов при изыскании объектов нефтяной промышленности. – Киев : Миннефтепром, 1981. – Текст : непосредственный.

18 ВСН 61–89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. – Москва, 1990. – Текст : непосредственный.

19 ВСН 77. Инструкция о порядке закрепления и сдачи заказчикам трасс магистральных трубопроводов, площадок промышленного и жилищного строительства и внеплощадочных коммуникаций. – Киев, 1977. – Текст : непосредственный.

20 ВСН 84–89. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. – Москва : Минтрансстрой, 1989. – Текст : непосредственный.

21 Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, Ю. Н. Чижова ; под ред. проф. Ю. К. Васильчука. – Москва : Изд-во Московского университета, 2008. – 571 с. – Текст : непосредственный.

22 Геодезический мониторинг подземных коммуникаций с применением 3D-моделирования / И. О. Биндер, Д. Б. Буренков, Г. А. Гринь, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 4. – С. 5–9.

23 ГКИНП (ГНТА)-03-010–03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – Москва : ЦНИИГАиК, 2004. – Текст : непосредственный.

24 ГКИНП (ОНТА)-02-262–02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002. – Текст : непосредственный.

25 Городков, Б. Н. Вечная мерзлота в северном крае / Городков Б. Н. // Труды Совета по изучению производительных сил. Серия северная. Вып. 1. Изд-во АН СССР, 1932. – 108 с. – Текст : непосредственный.

26 ГОСТ 24846–2012. Межгосударственный стандарт. Грунты. – Москва : Стандартиформ, 2014. – Текст : непосредственный.

27 ГОСТ 58367–2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Обустройство месторождений нефти на суше. – Москва : Стандартиформ, 2019. – Текст : непосредственный.

28 Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б. И. Далматов. – Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отд-е, 1988. – 415 с. – Текст : непосредственный.

29 Ермаков, А. П. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки / А. П. Ермаков, А. В. Старовойтов. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство. – № 6. – С. 91–97.

30 Журкин, И. Г. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен: монография / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 246 с. – Текст : непосредственный.

31 Ибрагимов, И. И. Автоматизация и оптимизация проектирования инженерных сооружений / И. И. Ибрагимов. – Ташкент : Изд-во ФАН, 1977. – 115 с. – Текст : непосредственный.

32 Ивченко, Г. И. Математическая статистика : учебник / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с. – Текст : непосредственный.

33 Инженерные изыскания коридоров линейных коммуникаций с учетом геотехнического мониторинга бугров пучения / П. П. Мурзинцев, И. О. Биндер, А. С. Репин, Б. О. Гриднева. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – № 10. – С. 7–13.

34 Карпик, А. П. Информационное обеспечение геодезической пространственной информационной системы / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 70–73.

35 Карпик, А. П. Оценка возможностей мониторинга земель территорий спутниковым методом / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 3–6.

36 Карпик, А. П. Проблемы геодезического обеспечения мониторинга территорий / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Традиции и инновации в начале XXI столетия : сб. материалов межрегионал. междисциплинарной науч. конф. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 13–20.

37 Карпик, А. П. Роль геоинформационного обеспечения территорий / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2004. – № 12. – С. 35–36.

38 Карпик, А. П. Спутниковые измерения – основа формирования пространственного положения объектов / А. П. Карпик, В. А. Скрипников, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // 3-й Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-98) : тез. докл. – Новосибирск : Ин-т математики. – 1998. – Ч. 3. – С. 110.

39 Карпик, А. П. Тенденции развития геодезических измерительных систем в двадцать первом веке / А. П. Карпик, А. К. Синякин, А. В. Кошелев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы геодезии и оптики : тез. докл. 51 научно-техн. конф., 16–19 апр. 2001 г. – Новосибирск : СГГА, 2001. – С. 110.

40 Карпик, А. П. Технология обеспечения геопространственными данными инфраструктуры транспортных коридоров / А. П. Карпик, А. В. Никитин, А. Р. Едигарян. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 7–18.

41 Карпик, А. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе : монография / А. П. Карпик, А. Г. Осипов, П. П. Мурзинцев. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 280 с. – Текст : непосредственный.

42 Климов, О. Д. Практикум по прикладной геодезии. Изыскания, проектирование и возведение инженерных сооружений : учеб. пособие для вузов / О. Д. Климов, В. В. Калугин, В. К. Писаренко. – Москва : ИД «Альянс», 2008. – 271 с. – Текст : непосредственный.

43 Колемаев, В. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник / В. А. Колемаев, В. Н. Калинина. – Москва : ИНФРА-М, 2002. – Текст : непосредственный.

44 Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов. – Москва : Недра, 1981. – 440 с. – Текст : непосредственный.

45 Лисицкий, Д. В. Геодезический мониторинг территорий / Д. В. Лисицкий, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 116–118 с.

46 Лисицкий, Д. В. Картографическое отображение трехмерных моделей местности / Д. В. Лисицкий, В. С. Хорошилов, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2 доп. – С. 216–218.

47 Лисицкий, Д. В. Основные принципы цифрового картографирования местности / Д. В. Лисицкий. – Москва : Недра, 1988. – 261 с. – Текст : непосредственный.

48 Ловягин, В. Ф. Альтернатива развития инженерных изысканий – структурная оптимизация технологического процесса / В. Ф. Ловягин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2006. – № 7. – С. 30–33.

49 Ловягин, В. Ф. Структура прикладной ГИС – проектирование с инженерных сооружений по геодезическим и геолого-геофизическим данным / В. Ф. Ловягин. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 4. – С. 58–67.

50 Маркович, К. И. Исследование особенностей визирования и измерения линий с использованием геодезических отражателей / К. И. Маркович, А. В. Ва-

люшкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 181–185.

51 Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока / Ю. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, А. К. Васильчук, Ю. Н. Чижова, Ю. В. Станиловская. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2014. – № 1. – С. 40–64.

52 Миграционные бугры пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, К. Йошикава, Ю. Н. Чижова, Ю. В. Станиловская. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2013. – № 3. – С. 14–34.

53 Миграционные бугры пучения на европейском севере России. Южный и северный пределы ареала и современная динамика / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, Ю. Н. Чижова. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2011. – № 6. – С. 56–72.

54 Мурзинцев, П. П. Геодезический мониторинг нефтегазовых месторождений / П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1, ч. 1. – С. 203–206.

55 Мурзинцев, П. П. Геодезический мониторинг – основа экологической безопасности и устойчивого развития территорий / П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный / Традиции и инновации в начале XXI столетия : сб. материалов межрегиональной междисциплинарной научной конференции. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 144–146.

56 Мурзинцев, П. П. Геодезический пространственный мониторинг территорий Западной Сибири / П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2010. – № 7. – С. 45–48.

57 Мурзинцев, П. П. Исследование светодиодной съемной насадки на отражатель электронного тахеометра / П. П. Мурзинцев, А. В. Новиков, А. С. Репин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч.

конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 64–73. – doi: 10.33764/2618-981X-2020-1-1-64-73.

58 Мурзинцев, П. П. О необходимости актуализации строительных норм и правил по инженерно-геодезическим изысканиям для районов Крайнего Севера / П. П. Мурзинцев, И. О. Биндер. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78, № 11. – С. 16–21. – doi: 10.22389/0016-7126-2017-929-11-16-21.

59 Мурзинцев, П. П. Особенности геодезического обеспечения строительства автодороги и пространственного мониторинга на Бованенковском месторождении / П. П. Мурзинцев, М. М. Павлов, А. С. Репин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2016. – № 2. – С. 2–5. – doi: 10.22389/0016-7126-2016-908-2-2-5.

60 Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – Текст : непосредственный.

61 Невечеря, В. Л. Криогенное пучение при многолетнем промерзании пород на севере Западной Сибири / В. Л. Невечеря. – Текст : непосредственный // Труды ВСЕГИНГЕО. – 1980. – Вып. 138. – С. 45.

62 Никитин, А. В. Совершенствование методов геодезических работ в транспортном строительстве : монография / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. – 152 с. – Текст : непосредственный.

63 Отчетная документация по инженерным изысканиям «Обустройство Валанжинских залежей Самбургского месторождения. Дожимная насосная станция». Ч. 2. «Инженерно-геологические изыскания». – 2014. – С. 81–86. – Текст : непосредственный.

64 Отчетная документация по инженерным изысканиям «Олимпийский лицензионный участок: южная часть Сеноманской залежи пласта пк1 Уренгойского месторождения и Добровольское месторождение. Куст скважин 11. Куст сква-

жин 16». Ч. 1. «Инженерно-геодезические изыскания». – 2014. – С. 3–29. – Текст : непосредственный.

65 Отчетная документация по инженерным изысканиям «Строительство поисково-оценочных скважин в пределах Агапского лицензионного участка». Ч. 1. «Инженерно-геодезические изыскания». – 2014. – С. 5–42. – Текст : непосредственный.

66 Оценка устойчивости насыпных инженерных сооружений методом конечных элементов / Т. Т. Ипалаков, Б. Апшикур, А. С. Репин, С. А. Айдынов. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию К. И. Сатпаева. – Усть-Каменогорск, 2019. – С. 378–382.

67 Патент № 164037 Российская Федерация, В62D 63/06 (2006.01), В62В 15/00 (2006.01), G01V 1/00 (2006.01). Устройство для транспортировки геодезического, георадарного, геологического оборудования и выполнения геодезических, георадарных и геологических работ: № 2015115652/02: 24.04.2015: опубл. 20.08.2016 / Биндер И. О., Мурзинцев П. П. – 2 с.: ил. – Текст : непосредственный.

68 Патент № 200746 Российская Федерация, МПК G01C 1/00 (2006.01), G02В 5/12 (2006.01), СПК G01C 1/00 (2020.08), G02В 5/12 (2020.08). Насадка светодиодная съемная на отражатель электронного тахеометра: № 2020108542: заявл. 26.02.2020 / Мурзинцев П. П., Новиков А. В., Репин А. С.; заявитель СГУГиТ. – 6 с.: ил. – Текст : непосредственный.

69 Патент № 2712796 Российская Федерация, G01C 5/00 (2019.08), G01V 3/12 (2019.08), G01K 13/00 (2019.08), E21В 47/065 (2019.08), E21В 47/122, (2019.08), G01N 33/24 (2019.08). Способ определения величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты: № 2019113686: заявл. 30.04.2019: опубл. 31.01.2020 / Мурзинцев П. П., Биндер И. О., Репин А. С.; заявитель СГУГиТ. – 9 с.: ил. – Текст : непосредственный.

70 Пономарева, О. Е. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского

стационара) / О. Е. Пономарева, А. Г. Гравис, Н. М. Бердников. – Текст : непосредственный // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 4. – С. 21–30.

71 Попов, А. И. Вечная мерзлота в Западной Сибири / А. И. Попов. – Москва : Изд-во Академии Наук СССР, 1953. – 230 с. – Текст : непосредственный.

72 Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – Москва : Наука, 1968. – 288 с. – Текст : непосредственный.

73 Репин, А. С. Актуальность 3D-моделирования в геодезии / А. С. Репин, С. Я. Скоренов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 64–67.

74 Репин, А. С. О методике геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород / А. С. Репин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 28–35. – doi: 10.33764/2411-1759-26-3-28-35.

75 Романовский, Н. Н. Бугры пучения / Н. Н. Романовский. – Текст : непосредственный / Горная энциклопедия. – Москва : Советская энциклопедия, 1984. – С. 292–293.

76 Рудерман, С. Ю. Развитие теории выбора трасс магистральных трубопроводов : автореф. дисс. д-ра техн. наук / С. Ю. Рудерман. – Москва : МИНПП, 1972. – 30 с. – Текст : непосредственный.

77 Сайт ExcelTABLE / Работа с таблицами. – URL: <https://exceltable.com/uroki-excel/samouchitel-excel-s-primerami/>. – Загл. с экрана. – Текст : электронный.

78 Сайт Национальный атлас РФ. – URL: <http://национальныйатлас.рф/cd2/412/412.html>. – Загл. с экрана. – Текст : электронный.

79 Создание геодезической основы для строительства объектов энергетики / Г. А. Уставич, Г. Г. Китаев, А. В. Никонов, В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 48–54.

80 Новицкий, А. Н. Мониторинг геодинамических явлений разрушительного характера при освоении месторождений / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. – С. 28–31.

81 Соловицкий, А. Н. О мониторинге деформаций земной коры при подземной геотехнологии освоении недр / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 3. – С. 53–55.

82 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – Москва, 1997. – Текст : непосредственный.

83 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть II. Выполнение съемки подземных коммуникаций при инженерно-геодезических изысканиях для строительства. – Москва, 1997. – Текст : непосредственный.

84 СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция 2.05.06-85*. – Москва, 2013. – Текст : непосредственный.

85 СП 126.13330.2012. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция 3.01.03-84. – Москва, 2013. – Текст : непосредственный.

86 СП 231.1311500.2015. Обустройство нефтяных и газовых месторождений. – Москва, 2015. – Текст : непосредственный.

87 СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – Москва, 2013. – Текст : непосредственный.

88 Спиридонов, Ю. В. Ошибки визирования при наблюдениях на призмные отражатели / Ю. В. Спиридонов. – Текст : непосредственный // Credo-Dialogue. Проблемы и решения. – 2004. – № 13.

89 СТО Газпром 2-2.1-249–2008. Магистральные газопроводы. – Москва, 2008. – Текст : непосредственный.

90 Струченков, В. И. Методы оптимизации в проектировании трасс линейных сооружений / В. И. Струченков. – Текст : непосредственный // Искусственный интеллект в технических системах : сб. научных трудов. – Москва : Гос., ИФТП. – 1999. – Вып. № 20.

91 Субботин, И. Е. Инженерно-геодезические работы при проектировании, строительстве и эксплуатации магистральных нефтепроводов / И. Е. Субботин. – Москва : Недра, 1997. – 140 с. – Текст : непосредственный.

92 Сукачев, В. Н. К вопросу о влиянии мерзлоты на почву / В. Н. Сукачев. – Текст : непосредственный // Изв. Академии Наук. – 1911. – Сер. 6. – Т. 5, № 1. – С. 24–33.

93 Хаметов, Т. Н. Геодезические работы при оценке эксплуатационных качеств здания и его конструкций : монография / Т. Н. Хаметов. – Пенза : ПГУАС, 2015. – 124 с. – Текст : непосредственный.

94 Шумский, П. А. Основы структурного ледоведения / П. А. Шумский. – Москва : Изд-во АН СССР, 1955. – 492 с. – Текст : непосредственный.

95 Ястребов, А. Л. Инженерные коммуникации на вечномерзлых грунтах / А. Л. Ястребов. – Ленинград : Стройиздат, 1972. – 175 с. – Текст : непосредственный.

96 Allard, M. Palsas and mineral permafrost mounds in northern Québec / M. Allard, M. K. Seguin, R. Levesque. – Текст : непосредственный // Intern. Geomorphology, Pt II / Ed. V. Gardiner, London, John Wiley. – 1986. – P. 285–309.

97 Intelligent Road Design / M. K. Jha, P. M. Schonfeld, J. C. Yong, E. Kim. – Текст : непосредственный // WIT Press. Southampton. – 2006.

98 Lewkowicz, A. G. Beaver damming and palsa dynamics in a subarctic mountainous environment. Wolf Creek, Yukon Territory, Canada / A. G. Lewkowicz, T. L. Coultish. – Текст : непосредственный // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2004. – V. 36. – № 2. – P. 208–218.

99 Scattered late-glacial and early Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in north-eastern European Russia / M. Valiranta, A. Kaakinen,

P. Kuhry et al. – Текст : непосредственный // Journal of Biogeography. – 2010. – V. 38. – Iss. 5. – P. 922–932.

100 Seppala, M. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics / M. Seppala. – Текст : непосредственный // Quaternary Research. – 2011. – V. 75. – 4. – P. 100–111.

101 Shafahi, Y. Optimum railway alignment / Y. Shafahi, M. J. Shahbazi. – URL: <http://www.uic.org/cdrom/2001/werr2001/pdf/sp/>. – Текст : электронный.

102 Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions / T. R. Christensen, T. Johansson, H. J. Åkerman, M. Mastepanov, N. Malmer, T. Friberg, P. Crill, B. H. Svensson // Geophysical Research Letters. – 2004. – 31. – 4.

103 The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia / J. S. Salonen, H. Seppala, M. Valiranta et al. – Текст : непосредственный // Quaternary Research. – 2011. – V. 75. – Iss. 4. – P. 100–111.

104 Zuidhoff, F. S. Palsa Growth and Decay in Northern Sweden. Climatic and Environmental Controls / F. S. Zuidhoff. – 2003. – P. 30. – ISBN 91-554-5546-8. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ
НАРУЖНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2712796

**Способ определения величины и направления деформации
наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Сибирский государственный университет геосистем и
технологий" (RU)*

Авторы: *Мурзицев Петр Павлович (RU), Биндер Игорь
Олегович (RU), Репин Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019113686

Приоритет изобретения 30 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 января 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 30 апреля 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

НАСАДКА СВЕТОДИОДНАЯ СЪЕМНАЯ НА ОТРАЖАТЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 200746

Насадка светодиодная съемная на отражатель

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет геосистем и технологий" (RU)*

Авторы: *Мурзинцев Петр Павлович (RU), Новиков Алексей Васильевич (RU), Репин Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2020108542

Приоритет полезной модели 26 февраля 2020 г.

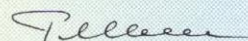
Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 26 февраля 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ОБЪЕДИНЕННАЯ СХЕМА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА
БУГРОВ ПУЧЕНИЯ