

УДК 624.131

Обоснование применения глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне

А.А. Филимонов^{a, b}, Л.А. Строкова^a^a Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: sla@tpu.ru^b АО «ТомскНИПИнефть»

634027, г. Томск, пр. Мира, д. 72. E-mail: filimonovaa@tomsknipi.ru

(Статья поступила в редакцию 18 октября 2023 г.)

В работе выполнен обзор нормативно-технической документации по применению глобальных навигационных спутниковых систем и геодезического мониторинга. Далее обоснован подбор допускаемой среднеквадратической погрешности и описана методика проведения измерений деформаций подземного трубопровода при помощи спутникового оборудования. Разработана программа проведения измерений деформаций объекта методами геометрического нивелирования и спутниковыми, рассчитаны приведенные затраты за период эксплуатации объекта обоих методов, выбран наиболее экономически эффективный способ. Отмечено преимущество применения спутниковых измерений по сравнению с оптическими геодезическими методами.

Ключевые слова: *вертикальные перемещения, подземный трубопровод, глобальная навигационная спутниковая система – ГНСС, многолетнемерзлые грунты.*

DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.46

Введение

Подземные трубопроводы являются сложным объектом с точки зрения организации геотехнического мониторинга (ГТМ) по причине своей протяженности, прокладки в сложнодоступных районах, требующих хорошей технической оснащённости, и значительного количества человеческих ресурсов. В зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) мониторинг осложняется разнообразными видами работ – измерением деформаций, температуры, высоты снежного покрова, уровня подземных вод. Большой объем элементов мониторинга, разный состав элементов сети для подземного трубопровода могут сильно расширять количество привлекаемых специалистов, а также увеличивать срок проведения измерений, что негативно сказывается на производительности подразделения, проводящего мониторинг. Поэтому применение современного оборудования и методов мониторинга линейных сооружений является актуальной задачей.

Наиболее сложным и трудозатратным видом работ при мониторинге является измерение деформаций. Самым распространенным методом измерения деформаций сооружений является геодезический метод геометрического нивелирования. Одним из наиболее современных способов определения местоположения объектов является применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (Елизаров, Курчатова, 2020; Гилаев, 2021; Соколова и др., 2019; Юров, 2022). Данное оборудование широко применяется при геодезических работах во время проведения инженерных изысканий, для топографической съемки, геодинамического мониторинга, строительства и иных сфер хозяйственной деятельности. Однако применение ГНСС для циклического отслеживания вертикальных перемещений ограничивается высокими погрешностями, получаемыми при измерении (Герко, 2021; Куштин и др., 2020; Нестеренко, 2016; Нестеренко и др., 2017; Фялковский, 2015).

В соответствии с пунктом 4.2 ГОСТ 24846-2019 для большей части подземных сооружений необходимым классом точности измерений рекомендуется принимать 2 класс, при котором допускаемая погрешность измерения вертикальных перемещений составляет 2 мм. При этом нормативно-технической документацией не предъявляются требования по предельным деформациям к геотехнической системе «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт», а расчетные осадки основания трубопровода могут достигать субметровых величин. Таким образом, обеспечение рекомендуемой точности с учетом отсутствия конкретных требований не является рациональным и экономически эффективным решением, в связи с чем предлагается рассмотреть применение современных методов измерения вертикальных перемещений при использовании ГНСС-оборудования.

Целью работы является обоснование возможности применения ГНСС-оборудования для отслеживания деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне, сравнение технико-экономических показателей данного метода с классическим методом геометрического нивелирования и выявление наиболее рационального и эффективного метода измерения.

Методика исследования

Исследование проведено в 2023 г. в АО «ТомскНИПИнефть» и включало в себя:

- 1) анализ нормативной литературы на предмет возможности применения ГНСС для мониторинга вертикальных перемещений;
- 2) определение методики и оборудования для проведения измерений деформаций при использовании ГНСС;
- 3) выбор объекта исследования, проведение технико-экономического сравнения применения различных методик измерения деформаций;
- 4) сравнение и анализ полученных результатов.

Анализ литературы по применению ГНСС оборудования для целей геотехнического мониторинга

Для проведения анализа были рассмотрены федеральные нормативно-технические

документы – своды правил и государственные стандарты о применении спутниковых навигационных систем. Перечень нормативных документов, регламентирующих основные положения глобальных навигационных спутниковых систем и различные аспекты применения ГНСС, обширен. Несмотря на это, отмечено отсутствие нормативного документа, описывающего или регламентирующего применение спутникового оборудования для проведения геодезического мониторинга или мониторинга деформаций. В таблице представлены документы, имеющие отдельные пункты или разделы, которые могут давать разъяснения или уточнять отдельные требования по применению ГНСС.

Метод измерения вертикальных перемещений следует устанавливать в зависимости от требуемой точности измерения, характеристик грунтов основания и экономической целесообразности в соответствии с пунктом 4.2 ГОСТ 24846-2019.

При этом пункт 6.4.19 ГОСТ 31937 – 2011 гласит, что определение точности измерения вертикальных и горизонтальных деформаций проводят в зависимости от ожидаемого расчетного значения перемещения, то есть предельной осадки природно-технической системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт».

Но подземные трубопроводы не имеют нормативного значения предельных деформаций и должны быть получены расчетным способом, о чем гласит пункт 8.5.4 ГОСТ 34737-2021 и пункт 5.4.1 СП 305.1325800.2017.

Таким образом, в соответствии с пунктом 7.7 СП 126.13330.2017, предельное отклонение, или предельные деформации, определяются по формуле:

$$\sigma = t \cdot m,$$

где σ – предельные деформации; t – величина, равная 2; 2,5; 3 с доверительной вероятностью соответственно 0,95; 0,98; 0,99; m – среднеквадратическая погрешность. Имея предельные деформации подземного трубопровода, можем получить необходимую среднеквадратическую погрешность измерения, либо точность:

$$m = \frac{\sigma}{t}.$$

Аналогичный подход имеется в СТО СРО-Г 60542954 00007-2020, согласно пункту 7.3.3.1

которого среднеквадратическая погрешность связана с предельной погрешностью ожидаемого параметра деформаций:

$$M_{\Delta\text{пред}} = \frac{\Delta}{2t},$$

где $M_{\Delta\text{пред}}$ – предельная погрешность; t – величина, равная 2; 2,5; 3 с доверительной вероятностью соответственно 0,95; 0,98; 0,99; Δ – ожидаемая деформация.

Связь предельной и среднеквадратической погрешностей определяются из уравнения:

$$M_{\Delta\text{пред}} = 3 * m,$$

где m – среднеквадратическая погрешность.

Преобразовывая формулу, получаем формулу среднеквадратической погрешности в зависимости от ожидаемой деформации:

$$m = \frac{\Delta}{3 \cdot 2t}.$$

Таблица. Перечень нормативно-технической документации, регламентирующей использование ГНСС для проведения измерения вертикальных деформаций

Нормативная документация	Область нормирования
СП 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве. СНиП 3.01.03-84 (с Изменением N 1)	Регламентирует производство геодезических работ и устанавливает требования к мониторингу деформаций строительных конструкций, исполнительным и контрольным съемкам, выполняемым при строительстве, реконструкции, эксплуатации
ГОСТ Р ИСО 17123-8-2011 «Оптика и оптические приборы. Методики полевых испытаний геодезических и топографических приборов. Часть 8. Полевые испытания GNSS-аппаратуры в режиме «Кинематика в реальном времени (RTK)»	Устанавливает методы полевых испытаний для определения и оценки прецизионности спутниковой аппаратуры в режиме «Кинематика в реальном времени» при проведении измерений
ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»	Стандарт регламентирует требования к работам и их составу по получению информации, необходимой для контроля и повышения степени механической безопасности зданий и сооружений, мониторингу технического состояния зданий и сооружений
СТО СРО-Г 60542954 00007-2020 «Геодезический мониторинг. Наблюдения за осадками и кренами зданий и сооружений»	Стандарт регламентирует требования к проведению геодезического мониторинга на уникальных объектах и сооружениях промышленных предприятий

Резюмируя таблицу, отметим, что в нормативах отсутствуют требования к применению ГНСС для измерения деформаций. В качестве обоснования применения ГНСС-оборудования следует применять формулы среднеквадратической погрешности вертикальных измерений от предельных деформаций подземного трубопровода.

Методика проведения мониторинга деформаций подземного трубопровода с применением ГНСС

Спутниковые системы могут работать в различных режимах, определяющих функциональные возможности и принцип проведения измерений.

Существуют два фундаментальных способа работы.

1. Режим статической съемки (режим «Статика»).

Отличается субсантиметровой точностью получаемых измерений, но требователен ко времени инициализации приемника в пункте съемки. Продолжительность сеанса наблюдений зависит от длины определяемых векторов, количества одновременно наблюдаемых спутников, паспортной точности спутникового геодезического оборудования и требуемой точности определяемых пунктов, но в большинстве случаев составляет не менее 1 часа. Может использоваться в совместной работе нескольких ГНСС-приемников для одновременного сбора данных в полигонах. Требуется обязательной постобработки полученных данных в геодезическом программном обеспечении.

2. Режим кинематической съемки в реальном времени («real-time kinematic», или «RTK»).

Является самым быстрым способом съемки спутниковыми приемниками, в котором вся обработка получаемых со спутника данных происходит в реальном времени, непосредственно в контроллере, а обмен дифференциальными поправками между приемниками, управление съёмкой обеспечивает полевое программное обеспечение. Режим является менее точным, по сравнению со статической съемкой характеризуется субдециметровыми погрешностями съемки.

При работе в данном режиме базовый неподвижный приемник находится на пункте с известными координатами, а подвижный приемник – ровер – перемещается по пунктам для определения местоположения. Дифференциальные поправки, формируемые опорным приемником, передают на подвижный приемник посредством беспроводной связи и используют для повышения точности определения координат антенны этого приемника. При этом скорость получения данных о местоположении ровера при поддерживаемой инициализации приемника измеряется десятками секунд.

Стоит отметить, что существуют и иные современные технологии, позволяющие исключить этап создания опорной геодезической сети – это постоянно действующие базовые станции с заранее известными координатами, стационарно расположенные на определенных объектах инфраструктуры города или месторождения, где им обеспечены качественные условия обзора и стабильная связь с глобальной сетью Интернет. Данные базовые станции, являясь одним из компонентов системы, позволяют пользователю при наличии одиночного ровера выполнять высокоточные геодезические измерения, однако требуют развития сети постоянно работающих и доступных спутниковых базовых станций.

Также есть абсолютный метод получения местоположения – метод точного позиционирования (Precise Point Positioning), основанный на применении спутниковой корректирующей информации, позволяющий определять пространственные координаты объектов

с точностью от нескольких дециметров до нескольких сантиметров на эпоху выполнения измерений с применением только одного приемника. Однако для достижения субдециметровой точности требуется значительное время, при этом полученные данные будут в глобальной системе координат.

Наиболее важными параметрами ГНСС-приемника при проведении съемочных работ являются:

1. Точность измерения.

Точность описывается для различных режимов. В среднем, у профессиональных приемников для статической съемки плановая точность составляет $2,5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, а высотная точность – $5,0 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, для съемки в реальном времени плановая точность составляет $8,0 \text{ мм} + 1,0 \text{ мм/км}$, а высотная точность – $15,0 \text{ мм} + 1,0 \text{ мм/км}$.

2. Каналы связи.

Информация о координатах может использоваться тогда, когда она передается другому устройству, и чем больше возможностей передать информацию имеет приемник, тем качественнее и быстрее будут выполнены измерения. Современные приемники имеют поддержку сетей Wi-Fi, Bluetooth, УКВ-модем, GSM- и GPRS-модуль одновременно, расширяя рабочий спектр и возможности использования.

3. Защита от воздействия окружающей среды, от механических воздействий.

GNSS-приемники, как и любое полевое оборудование, применяются в различных климатических зонах, в разное время года и должны позволять работать при всевозможных погодных условиях. Одним из главных преимуществ спутникового геодезического оборудования перед оптическим оборудованием является возможность выполнения съемки в непригодных для применения иного геодезического оборудования условиях – пониженных температурах атмосферы, снегопаде, тумане, недостаточной освещенности. Также стоит отметить, что при спутниковой съемке климатические условия не влияют на точность получаемых результатов.

4. Рабочее время сессии.

Спутниковая съемка, особенно статическая съемка, в значительной степени зависит

от времени работы приемника. Современное оборудование позволяет производить «горячую» замену батарей, позволяющих продлевать съемку для получения наиболее точных решений.

5. Компенсация наклона вехи приемника.

Технология, позволяющая проводить измерения без предварительной установки устройства по уровню, а также ускорить рабочий процесс и уменьшить неточности съемки.

Основных этапов в спутниковых измерениях, как и при геометрическом нивелировании, два – создание опорной геодезической сети по грунтовым реперам при помощи статического съемки и нивелирования по деформационным маркам при помощи съемки в реальном времени.

Выбор объекта исследования

Объектом исследования был выбран подземный газопровод диаметром 630 мм с тепловой изоляцией толщиной 85 мм и протяженностью 7700 м в Ямало-Ненецком автономном округе.

Климатическая характеристика района

Климатическая характеристика района трассы составлена по ближайшей метеостанции Уренгой. Самым холодным месяцем года является январь, средняя месячная температура составляет минус 26,5 °С. Температура воздуха самой холодной пятидневки, обеспеченностью 0,98 – минус 50 °С, обеспеченностью 0,92 – минус 48 °С. Температура воздуха наиболее холодных суток, обеспеченностью 0,98 – минус 54 °С, обеспеченностью 0,92 – минус 52 °С. Температура воздуха обеспеченностью 0,94 – минус 36 °С. Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца составляет 9,4 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха минус 56 °С.

Самым теплым месяцем является июль, средняя месячная температура составляет 15,5 °С. Температура воздуха с обеспеченностью 0,95 – плюс 19 °С, с обеспеченностью

0,98 – плюс 23 °С. Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца составляет плюс 20,9 °С. Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее теплого месяца – плюс 10,4 °С. Абсолютная максимальная температура воздуха составляет плюс 34 °С.

Осадки в среднегодовой сумме составляют 496 мм. Количество осадков за апрель-октябрь составляет 360 мм. Количество осадков за ноябрь-март составляет 136 мм. Максимальное суточное количество осадков составляет 65 мм. Средняя скорость ветра равна 3,7 м/с. Максимальная наблюдаемая скорость ветра – 40 м/с.

Из неблагоприятных атмосферных явлений отмечаются туманы, метели, грозы и град. Туманы непрерывно сохраняются от нескольких минут до нескольких суток. В холодное полугодие туманы наиболее продолжительны. Среднее число дней с туманами в году – 15, наибольшее – 31.

Грозы чаще всего наблюдаются в теплое время года (июле) и сопровождаются чаще всего сильным ветром, ливнем и градом. Общее число дней с грозой за период с мая по сентябрь – 12. Наибольшее число дней с грозой в году – 21.

Геокриологические условия

Согласно карте геокриологического районирования Западно-Сибирской равнины, район исследования расположен в Надым-Пуровской геокриологической области в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов. Криогенные процессы на данной территории имеют значительное распространение. Развитие криогенных процессов тесно связано с формированием сезонно-протаивающего и сезоннопромерзающего слоев. На территории участка в зоне развития ММГ многолетнемерзлые грунты в вертикальном разрезе имеют непрерывное распространение и прослеживаются на всю глубину разреза: кровля вскрыта с поверхности, подошва мерзлых грунтов геологическими скважинами не вскрыта.



Рис. 1. Спутниковый снимок местоположения подземного газопровода

Многолетнемерзлые грунты представлены торфами, суглинками, глинами и песками. Торфы имеют слоистую криогенную текстуру, пески – массивную криогенную текстуру, глинистые грунты – массивную и слоистую криогенную текстуру. По льдистости многолетнемерзлые грунты характеризуются от слабольдистых до льдистых. Значение среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов – минус 0,5 °С.

Многолетнемерзлые грунты на участке трассы обладают высокими прочностными свойствами. Их механические характеристики соизмеримы с соответствующими показателями полускальных грунтов.

В геологическом отношении территория месторождения относится к молодой Западно-Сибирской плите. На глубоко метаморфизованном фундаменте докембрийского возраста залегают слабо дислоцированные эффузивно-осадочные образования верхнего палеозоя и триаса (промежуточный структурный этаж) и собственно платформенный чехол, сложенный мезокайнозойскими осадочными породами и четвертичными отложениями.

В геологическом строении принимают участие неоплейстоценовые озерно-аллювиальные отложения, перекрытые с поверхности мохово-растительным слоем мощностью до 0,3 м. Экзогенные процессы на изучаемой территории представлены заболачиванием, подтоплением и морозным пучением.

Построение программы мониторинга для измерения деформаций

Всего по трассе исследуемого трубопровода располагаются 3 узла запорной арматуры – в начале на ПК0+00, на ПК56+30 и в конце трубопровода на ПК77+00. На каждом узле запорной арматуры располагается куст реперов из 3 реперов для нивелирования сооружений узла, один из которых используется в общей опорной сети для нивелирования марок трубопровода, и 3 одиночных грунтовых репера, расположенных по трассе с шагом от 1,5 до 2 км, для обеспечения требуемой точности нивелирования. Для мониторинга вертикальных перемещений установлены кольцевые деформационные марки с шагом 150 м в количестве 51 штуки.

Геометрическое нивелирование

В качестве основного метода измерений вертикальных перемещений, согласно пункту 6.3.1 ГОСТ 24846-2019, следует применять геометрическое нивелирование.

Первым этапом создаётся местная опорная геодезическая сеть между грунтовыми реперами, вторым этапом проводится измерение перемещений на деформационных марках (рис. 2 а). Все измерения по маркам проводятся замкнутым ходом из репера с известными высотными координатами.

Для оценки стоимости мониторинга деформаций трубопровода на период эксплуатации методом геометрического нивелирования приняты следующие исходные данные.

1. Принцип использования многолетнемерзлых грунтов – II принцип.

2. Проектный класс точности измерения – II класс по опорной сети, II класс по деформационным маркам.

3. Количество грунтовых реперов опорной сети – 6 штук.

4. Количество деформационных марок – 51 штука.

5. Срок эксплуатации – 25 лет.

6. Периодичность измерения деформаций, в соответствии с СП 497.1325800.2020, в первые три года эксплуатации – не менее двух раз в год, в дальнейшем – один раз в два года. Общее количество циклов – 17 циклов измерений;

7. Бригада для проведения измерений – 1 геодезист, 2 замерщика.

8. Оборудование – цифровой нивелир – 1 шт., рейка 2 м – 2 шт.

Стоимость работ по проведению геотехнического мониторинга при применении метода геометрического нивелирования принята по сборникам базовых цен на проведение инженерно-геодезических изысканий.

Спутниковая геодезическая съемка

Для создания опорной сети проводится одновременная статическая съемка в двух или трех точках на грунтовых реперах (зависит от количества используемых спутниковых приемников) не менее 1 часа с частотой не более 10 Гц, образуя полигоны треугольной

формы (рис. 2 б). Таким образом, объединяются все реперы в единую опорную сеть с известными координатами, от каждого из которых можно производить дальнейшие измерения вертикальных перемещений марок.

Дальность спутникового метода и количество приемников позволяет объединять разный набор реперов (Елизаров, Курчатова, 2020). При работе с двумя приемниками потребуется 8 сессий для определения высотных координат реперной сети – ГР1-ГР2, ГР1-ГР3, ГР2-ГР3, ГР3-ГР4, ГР3-ГР5, ГР 4-ГР5, ГР4-ГР6, ГР5-ГР6.

При работе с тремя приемниками будет достаточно 3 последовательных сессий: ГР1-ГР2-ГР3, ГР3-ГР4-ГР5, ГР4-ГР5-ГР6 для получения всех векторов, определения высотных координат и объединения всех реперов в опорную сеть, имея одну объединяющую точку в репере между сессиями. Однако, добавляя одну сессию ГР2-ГР3-ГР4, мы получим такую конфигурацию полигонов, в которой в каждом измерении из 3 приемников перемещается всего 1, а остальные 2 дублируют свое предыдущее положение, что позволит производить более точную постобработку измерений и свести погрешность к минимуму.

Для определения возможности применения кинематической съемки в реальном времени была рассчитана среднеквадратическая погрешность на объекте.

Максимальная расчетная просадка на трубопроводе составила 47 см, таким образом:

$$m = \frac{\Delta}{3 \cdot 2t} = \frac{470 \text{ мм}}{3 \cdot 2 \cdot 2} = 39,2 \text{ мм.}$$

При использовании кинематической съемки среднеквадратическая погрешность вертикальных измерений – 15 мм + 1 мм/км. С одного репера проводится измерение на расстоянии не более 1 км, таким образом, максимальная погрешность составляет 16 мм, что меньше допускаемой расчетной среднеквадратической погрешности.

Следовательно, применение данного режима обосновано, проводится съемка в реальном времени с ближайшего грунтового репера по деформационным маркам. При этом требуется производить контроль наблюдений с разных реперов в одной деформационной марке.

Условные обозначения:

- - полигон для уравнивания опорной сети
- (красная линия) - проектный подземный трубопровод
- ⊙ ГР2 - одиночный грунтовый репер
- △ ГР1 - репер из куста реперов

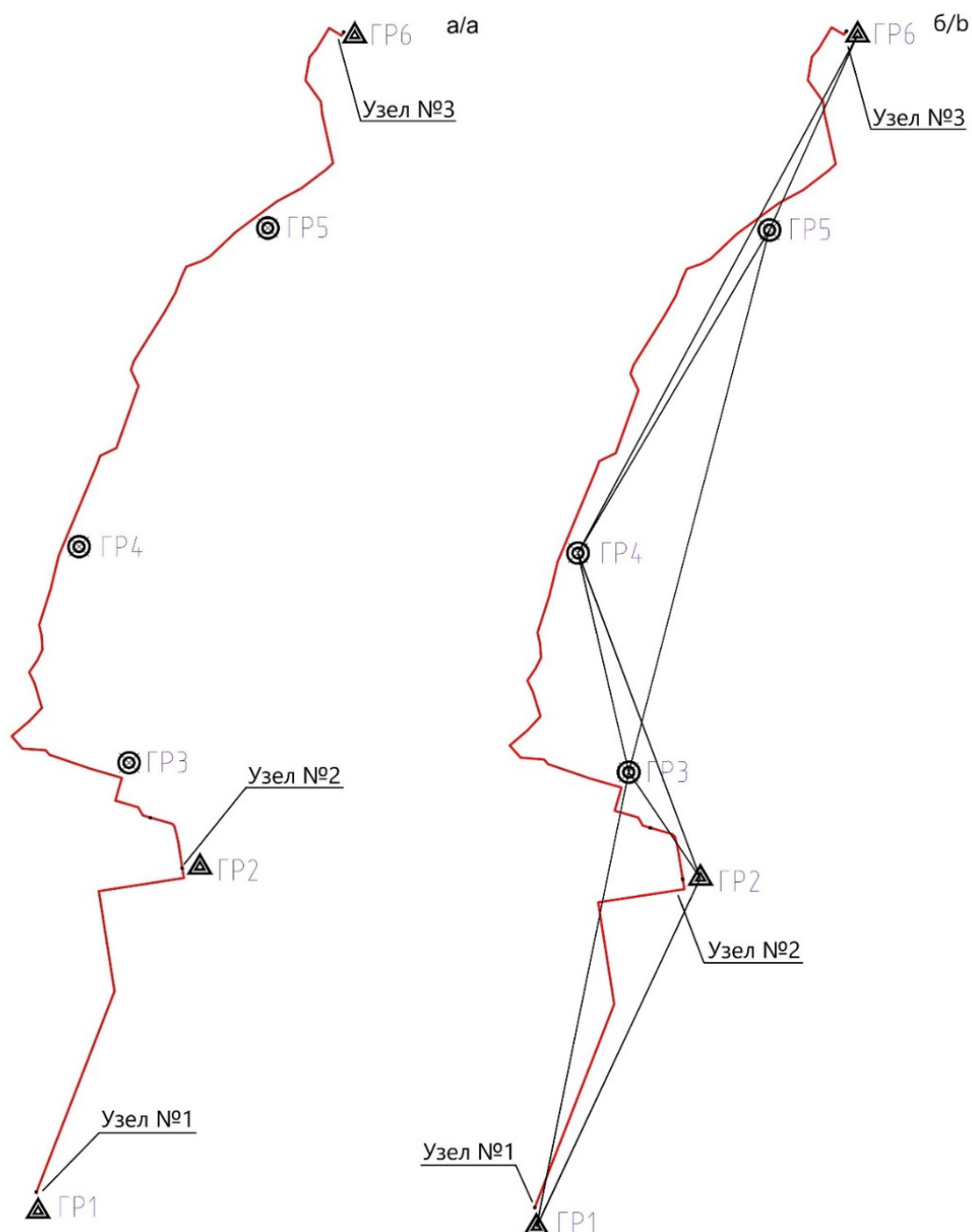


Рис. 2. Сеть элементов геотехнического мониторинга: а) план расположения элементов опорной сети объекта для геометрического нивелирования; б) полигоны для уравнивания опорной сети при использовании ГНСС-оборудования в статической съемке

Стоит отметить, что состав элементов сети мониторинга не отличается от сети для проведения методом геометрического нивелирования, что позволит применять методы

геометрического нивелирования при необходимости подтверждения высокоточными методами.

Экономическая эффективность предлагаемой методики

Общая стоимость примененного метода была рассчитана методом приведенных затрат. Расчет приведенных затрат позволяет сравнить между собой и выбрать оптимальный вариант использования технологий. Данный метод чаще всего используется при принятии инвестиционных решений и оценке эффективности проектов. Приведенные затраты выступают суммой капитальных и эксплуатационных вложений за период эксплуатации, с учетом инфляции и ставки дисконтирования. Результатом являются чистые приведенные затраты за весь период эксплуатации. Эффективность технологии определяется наименьшим количеством затрат между сравниваемыми вариантами.

Приведенные или дисконтированные затраты определяются по формуле:

$$Пз = \sum \frac{(Кз + Эз)}{(1 + Сд)^{СрД}},$$

где Пз – приведенные затраты, руб.; Кз – капитальные затраты на оборудование, руб.; Эз – эксплуатационные затраты на проведение мониторинга, руб.; Сд – ставка дисконтирования, %; СрД – срок дисконтирования (срок эксплуатации).

Итоговые приведенные затраты на 17 циклов измерений в период эксплуатации методом геометрического нивелирования – 4,4 млн руб., спутниковым методом – 1,7 млн руб.

Выводы

1. Проведен анализ нормативно-технической документации, выявлено отсутствие регламентирования применения спутниковой геодезической аппаратуры для измерения вертикальных деформаций, обосновано применение формулы обеспечения достаточной точности измерений вертикальных перемещений от ожидаемых деформаций.

2. Представлена методика проведения измерений вертикальных деформаций при применении различных режимов ГНСС-оборудования, описаны положительные стороны применения спутникового оборудования по сравнению с традиционными методами нивелирования.

3. На основе проектируемой сети геотехнического мониторинга объекта исследования было рассмотрено применение методов геометрического нивелирования и спутниковых измерений при проведении геодезического мониторинга, проведен технико-экономический расчет по приведенным затратам, выявлен экономический эффект от применения измерений при помощи ГНСС-оборудования.

Библиографический список

Герко С.А., Марков С.С., Мазепа Р.Б. Перспективы использования ГЛОНАСС при решении специальных задач // Электросвязь. 2021. № 11. С. 38–46. DOI 10.34832/ELSV.2021.24.11.004. – EDN KTZZRD.

Гиляев Д.М., А.А. Загретдинов, Р.В. Загретдинов Опыт и перспективы использования ГНСС-технологий на месторождениях нефти и газа // Маркшейдерский вестник. 2021. № 2(141). С. 21–27. EDN ASPIEC.

Елизаров А.С., Курчатова А.Н. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25, №1. С. 28–42. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-28-42. EDN IULLWX.

Соколова В.А., Морковская С.А., Науменко В.С., Куштин В.И. Создание высотного геодезического обоснования для наблюдения за осадками сооружений // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2019), Том 3. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2019. С. 176–179.

Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В. Оценка возможности и точности применения GNSS-систем для мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2016. № 4. С. 15. EDN YFTZSD.

Нестеренко Ю.М., Цвяк А.В., Нестеренко М.Ю. Методические основы геодинимического мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. № 4. С. 10. EDN YLNLTP.

Куштин В.И., Ревякин А.А., Соколова В.А., Добрынин Н.Ф. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11(71). С. 27–37. EDN OCGBHG.

Фялковский А.Л. Деформационный мониторинг высотных сооружений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 54–59. EDN TUGOMX.

Юров Ф.Д. Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в

криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 02 декабря 2022 года. М.: Геомаркетинг, 2022. С. 234–242. EDN ZQCREO.

Justification of the Application of Global Navigation Satellite System for Monitoring Deformations of Underground Pipelines in the Cryolithozone

A.A. Filimonov^{a, b}, L.A. Strokov^a

^a Tomsk Polytechnical University 30 Lenina Str., Tomsk 634050, Russia. E-mail: sla@tpu.ru

^b TomskNIPIneft, 72 Mira Ave., Tomsk 634027, Russia. E-mail: filimonovaa@tomsknipi.ru

Review of regulatory and technical documentation on the use of Global Navigation Satellite System (GNSS) and geodetic monitoring was carried out. The lack of regulatory requirements for measuring vertical movements by satellite methods was identified. The suggestion for selection of the permissible root-mean-square error measurements using GNSS equipment is made, and a method for measuring underground pipeline deformations is described. The deformation measurement data obtained using both geometric leveling and the satellite method were compared. The reduced cost for the period of operation of the object using these methods was calculated, and the most cost-effective method was selected. The advantage of the expanded capabilities of using satellite measurements compared to optical geodetic method is noted.

Key words: *geotechnical monitoring; deformations; vertical movements; underground pipeline; Global Navigation Satellite System – GNSS; satellite equipment; permafrost.*

References

Gerko S.A., Markov S.S., Mazepa R.B. 2021. Perspektivy ispolzovaniya GLONASS pri reshenii specialnykh zadach [Prospects for using GLONASS in solving special problems]. *Elektrosvyaz*. (in Russian) 11:38–46. doi: 10.34832/ELSV.2021.24.11.004.

Gilaev D.M., Zagretdinov A.A., Zagretdinov R.V. 2021. Opyt i perspektivy ispolzovaniya GNSS-tekhnologii na mestorozhdeniyakh nefti i gaza [Experience and prospects for using GNSS technologies in oil and gas fields]. *Surveyor's Bulletin*. 2(141):21–27. (in Russian)

Elizarov A.S., Kurchatova A.N. 2020. Monitoring nadzemnykh truboprovodov s pomoshchyu globalnykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [Overhead pipeline monitoring using global navigation satellite systems]. *Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 25(1):28–42. (in Russian) doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-28-42.

Sokolova V.A., Morkovskaya S.A., Naumenko V.S., Kushtin V.I. 2019. Sozдание vysotnogo geodezicheskogo obosnovaniya dlya nablyudeniya za osadkami sooruzheniy [Creation of high-altitude geodetic justification for monitoring the structures subsidence]. *In: Transport: science, education, production (Transport-2019)*. V. 3. Technical sciences.

Height. State Univ. communication routes. Rostov, pp. 176–179. (in Russian)

Nesterenko M.Yu., Tsvyak A.V. 2016. Otsenka vozmozhnosti i tochnosti primeneniya GNSS-sistem dlya monitoringa deformatsiy zemnoy poverkhnosti na razrabatyvaemykh mestorozhdeniyakh uglevodorodov [Assessing the feasibility and accuracy of using GNSS systems for monitoring earth surface deformations in developed hydrocarbon fields]. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 4:15. (in Russian)

Nesterenko Yu.M., Tsvyak A.V., Nesterenko M.Yu. 2017. Metodicheskie osnovy geodinamicheskogo monitoringa s ispolzovaniem globalnykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [Methodological foundations of geodynamic monitoring using global navigation satellite systems]. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 4:10.

Kushtin V.I., Revyakin A.A., Sokolova V.A., Dobrynin N.F. 2020. Sovremennyye metody monitoringa deformatsiy zdaniy i sooruzheniy [Modern methods of monitoring of buildings and utilities deformation]. *Engineering Bulletin of the Don*. 11(71):27–37. (in Russian)

Fyalkovsky A.L. 2015. Deformatsionnyy monitoring vysotnykh sooruzheniy s ispolzovaniem

globalnykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [Deformation monitoring of high-rise structures using global navigation satellite systems]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 5:54-59. (in Russian)

Yurov F.D. 2022. Osobennosti organizatsii monitoringa lineynykh transportnykh sistem v kriolitozone

[Features of monitoring organization at linear transport systems in the permafrost zone]. *In: Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*. Moscow, Geomarketing, pp. 234-242. (in Russian)