

УДК 528.48

АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСАДОК ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Беличенко О.Д.¹, студент гр. КНб-241, II курс

Козлов С.И.¹, старший преподаватель кафедры АДиГК

Тихонова И.Ю.¹, ассистент кафедры АДиГК

¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Современная геодезия и картография играют ключевую роль в обеспечении информационной основы для проектирования и строительства инженерных сооружений. Именно геодезические методы представляют собой важнейший инструмент при исследовании местности, изучении деформационных процессов и решении актуальных задач строительства. Важно подчеркнуть, что на сегодняшний день наблюдается активное развитие данного научно-практического направления на основе интеграции цифровых и информационных технологий [1].

Информационные технологии находят свое применение в самых разных областях человеческой деятельности. Активное внедрение цифровых решений наблюдается в архитектуре и строительстве, в экономике, в военно-промышленном комплексе и иных значимых профессиональных сферах.

Информатизация активно развивается в области геодезии, принимая на себя часть интеллектуальной нагрузки. Особенностью использования таких технологий в геодезии является не только автоматическое выполнение трудоемких задач и анализа данных мониторинга, но и возможность самообучения для формирования наиболее эффективных алгоритмов решения задач. Особая актуальность развития искусственного интеллекта в геодезии проявляется при решении задач оценки деформаций, контроля технического состояния сооружений и поддержки принятия решений. Помимо этого, наиболее перспективным направлением развития интеллектуальных технологий в геодезии является лазерное сканирование и обработка изображений с использованием ряда других инновационных цифровых технологий [2].

В рамках исследования была выполнена комплексная работа по анализу и прогнозированию деформаций на основе реальных данных геодезического мониторинга.

Деформация – это изменение положения, формы или размеров сооружения под воздействием внешних и внутренних сил. Геодезический мониторинг позволяет отслеживать эти изменения во времени с помощью высокоточных измерений.

Для мониторинга выделяют несколько основных видов перемещений: абсолютные осадки (вертикальное смещение), относительные осадки (крен), горизонтальные смещения и вибродеформации.

Причины деформаций разнообразны: свойства грунтов, изменение уровня грунтовых вод, неравномерность нагрузки, динамические воздействия, климатические факторы. Наблюдаемая деформация обычно складывается из нескольких составляющих - мгновенной, упругой, длительной и циклической.

Объектом исследования выступил *Музейный и театрально-образовательный комплекс в г. Кемерово* представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Строящийся музейно-театральный комплекс

Исследуемый участок работ как видно на рисунке 2 расположен в Центральном районе г. Кемерово, в квартале, ограниченном проспектами Советский и Притомский и ул. Мичурина. Данный объект относится к категории уникальных и особо ответственных сооружений, что предъявляет повышенные требования к точности контроля за его техническим состоянием.

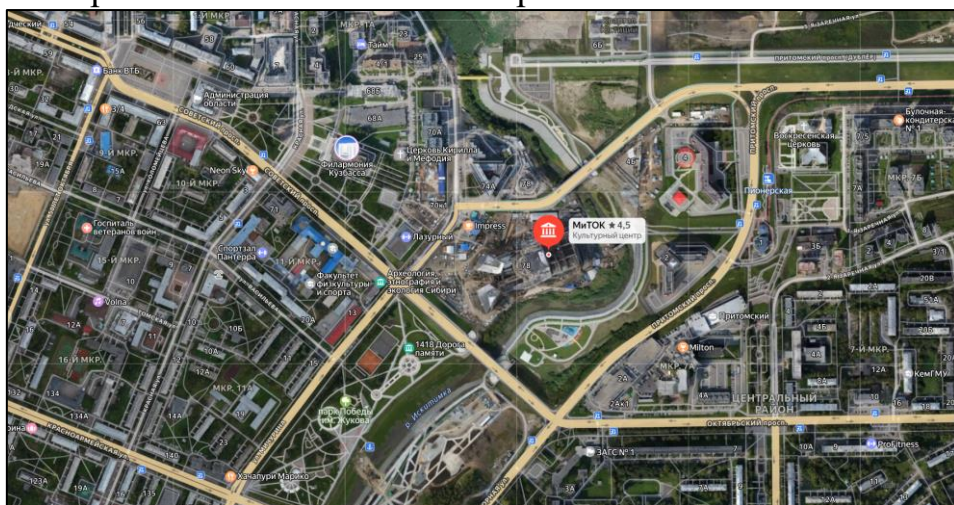


Рисунок 2 – Исследуемый участок работ

Инженерно-геологические условия площадки. Площадка строительства расположена в Центральном районе г. Кемерово, в квартале, ограниченном проспектами Советский, Притомский и ул. Мичурина. В геоморфологическом

отношении территория приурочена к долине реки Большая Камышная (приток р. Томь), что определяет сложность инженерно-геологических условий.

Согласно результатам инженерно-геологических изысканий, в геологическом строении площадки до глубины 22,0 м принимают участие следующие грунты (сверху вниз):

- насыпной и намывной грунт (ИГЭ 1а, 1б);
- органо-минеральный грунт представлен суглинком мягкопластичным (ИГЭ 3);
- суглинок аллювиально-делювиальный полутвердый, непросадочный (ИГЭ 4б);
- суглинок аллювиальный тугопластичный и мягкопластичный (ИГЭ 5б);
- супесь песчанистая, пластичная (ИГЭ 6б);
- гравийный и галечниковый грунт (ИГЭ 9). Залегает с глубины 3,3 – 9,3 м (абс. отметки 107,11 – 111,61 м);
- скальный грунт представлен песчаником (ИГЭ 16). Как видно на рисунке 3 геологический разрез имеет сложное строение.

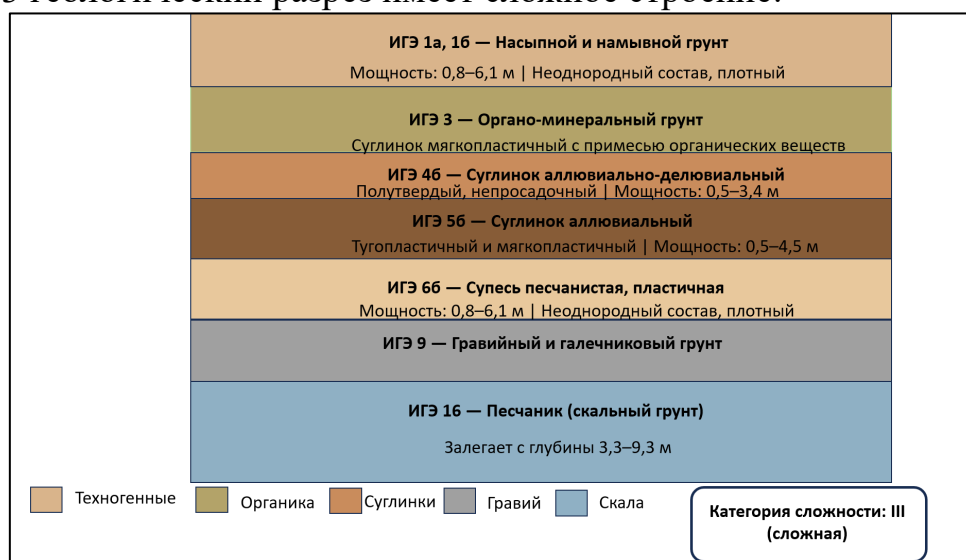


Рисунок 3 – Геологический разрез исследуемой площадки

На период изысканий (декабрь 2019 г.) уровень подземных вод фиксировался на глубине 2,5 – 7,6 м от поверхности земли, что соответствует абсолютным отметкам 108,09 – 112,03 м.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Первый от поверхности горизонт приурочен к аллювиальным отложениям и зафиксирован на глубине 1,2–3,5 м (январь 2022 г.). Второй горизонт, связанный с зоной трещиноватости песчаников, вскрыт на глубине 9,0–12,0 м и обладает напором 3,4–5,2 м.

Результирующий уровень воды р. Бол. Камышная в границах площадки изысканий составит 116,07 м (ГС 1929 г.), т.к. рассматриваемый участок попадает в зону выклинивания подпора р. Томь.

Нормативная глубина сезонного промерзания для суглинков составляет 185 см, для крупнообломочных грунтов - 273 см [3].

Сейсмичность площадки по результатам сейсмического микрорайонирования с учетом уточнений ИФЗ РАН составляет **6,20 балла** по карте ОСР-2015-В [4].

Организация геодезического мониторинга. Геодезический мониторинг комплекса осуществляется с применением современного высокоточного оборудования. Для наблюдений за осадками в подвальной части здания, где установлено 192 осадочные марки, используется *электронный нивелир Sokkia SDL50* [5].

Для наблюдений за входной группой и внешним контуром здания применялся *электронный тахеометр Leica TS06plus R1000 Arctic (1"; EGL)*.

Прибор обладает угловой точностью 1", дальностью безотражательных измерений до 1000 м и возможностью работы при температурах до -35°C , что особенно актуально для сибирских климатических условий. Лазерный центрир и встроенное программное обеспечение FlexField позволяют оперативно выполнять полевые измерения и сохранять результаты во внутренней памяти [6].

Формирование базы данных для анализа. В подвале здания установили 192 марки (обозначены M1, M2 и так до M192).

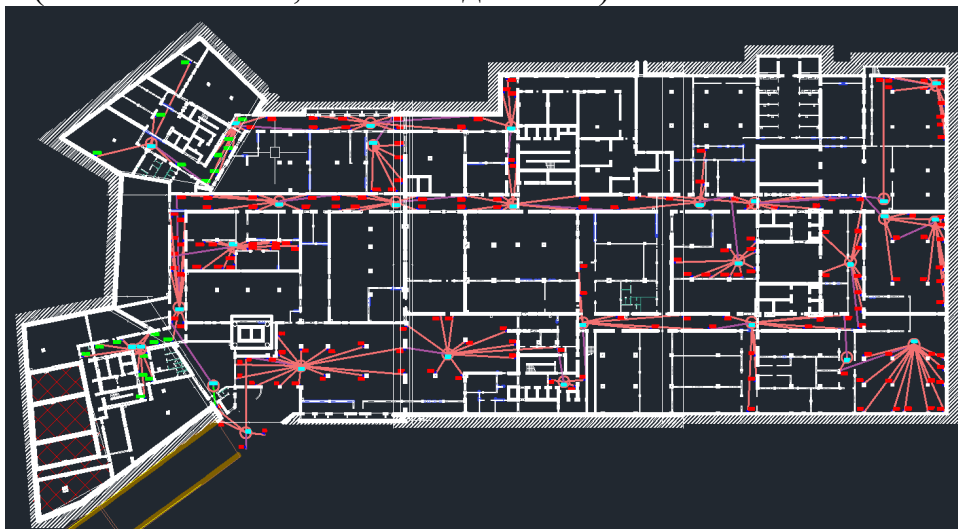


Рисунок 4 – Схема исследуемого объекта

Наблюдения за осадками ведутся с ноября 2024 года по настоящее время. На момент исследования было доступно 16 циклов измерений, выполненных методом высокоточного геометрического нивелирования. Исходные данные, представленные в формате таблиц журналов наблюдений.

5	113,347	113,347	0,001	113,349	0,002	113,349	0,002	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
6	113,356	(отсутствует доступ)		113,359		113,346	-0,001	113,437	0,000
7	113,356	113,357	0,000	113,357	0,002	113,359	0,002	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
8	113,334	113,335	0,000	113,337	0,003	113,337	0,002	113,337	0,003
9	113,267	113,268	0,001	113,270	0,003	113,270	0,003	113,271	0,003
10	113,235	113,235	0,001	113,238	0,003	113,238	0,003	113,238	0,003
11	113,486	113,486	0,000	113,488	0,002	113,488	0,002	113,488	0,002
12	113,530	113,530	0,000	113,532	0,002	113,533	0,003	113,534	0,004
13	113,434	113,434	0,001	113,436	0,002	113,436	0,003	113,437	0,003
14	113,441	113,442	0,001	(отсутствует доступ)		(отсутствует доступ)		(отсутствует доступ)	
15	113,499	113,500	0,001	113,501	0,002	113,501	0,003	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
16	113,461	(отсутствует доступ)		113,464	0,003	113,464	0,003	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
17	113,745	113,746	0,001	113,747	0,002	113,748	0,003	(отсутствует доступ)	113,747
18	113,624	113,625	0,000	113,627	0,002	113,627	0,003	113,629	0,004
19	113,573	113,573	0,000	113,575	0,002	113,575	0,002	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
20	113,768	113,768	0,000	113,770	0,002	113,771	0,003	(отсутствует доступ)	113,769
21	113,847	113,848	0,000	113,849	0,002	113,850	0,003	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
22	113,792	113,792	0,000	113,794	0,002	113,795	0,003	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
23	113,976	113,976	0,000	(отсутствует доступ)		113,978	0,003	(отсутствует доступ)	(отсутствует доступ)
24	113,905	113,905	0,000	113,907	0,002	113,908	0,003	113,907	0,002
25	113,914	113,913	0,000	113,915	0,001	113,916	0,002	113,915	0,002
26	113,854	113,854	0,000	(отсутствует доступ)		113,680		113,680	0,000
27	113,263	113,263	0,000	113,264	0,001	113,266	0,002	113,265	0,002
28	113,351	113,351	0,000	113,353	0,001	113,354	0,002	(отсутствует доступ)	113,352
29	113,417	113,417	0,000	113,418	0,001	(отсутствует доступ)		(отсутствует доступ)	113,417
30	113,459	113,459	-0,001	113,460	0,001	113,462	0,003	113,462	0,003
31	113,504	113,504	0,000	113,504	0,001	113,506	0,002	113,505	0,002
32	113,539	113,539	0,000	113,540	0,001	113,541	0,002	113,541	0,002

Рисунок 5 – Журнал наблюдений

Анализ поведения марок. На втором этапе был выполнен визуальный и статистический анализ поведения марок. Выделены три основных типа деформационного поведения:

- **стабильные марки** (около 65%) - колебания отметок в пределах 1-2 мм за весь период наблюдений, отсутствие выраженного тренда;
- **марки с монотонной осадкой** (около 30%) - устойчивое снижение отметок со средней скоростью от 0,5 до 2,0 мм в месяц;
- **аномальные марки** (около 5%) - резкие скачки отметок, связанные с механическими воздействиями или повреждением марок (например, марка М4, М63, М103, М104, М127).

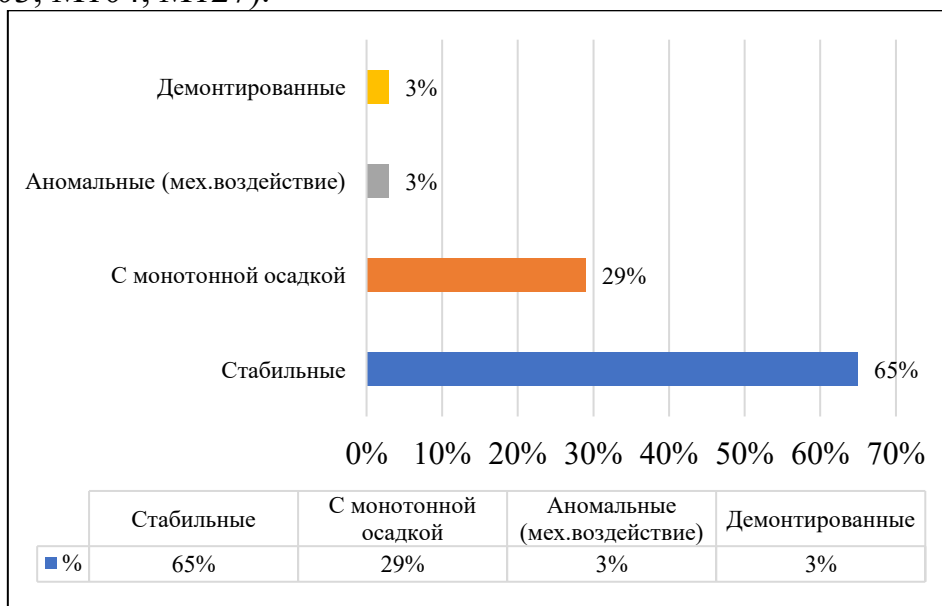


Рисунок 6 – График распределение осадочных марок по характеру осадки

Кроме того, выявлены марки, которые были демонтированы в процессе наблюдений (М133, М145, М185, М188-М192), что также является важной информацией для корректной интерпретации результатов.

Прогнозирование деформаций различными методами. На третьем, ключевом этапе была поставлена задача сравнительного анализа

эффективности различных методов прогнозирования деформаций. Для этого использовались данные первых 15 циклов наблюдений (до 27 января 2026 года) в качестве обучающей выборки, а 16-й цикл (25 февраля 2026 года) - в качестве контрольной. Прогнозирование выполнялось тремя методами:

Ручной градиентный бустинг - алгоритм машинного обучения, реализованный на языке Python без использования специализированных библиотек. Модель представляет собой ансамбль решающих деревьев, каждое из которых обучается на ошибках предыдущих. Для обучения использовались следующие признаки:

- время наблюдения (дни от начала мониторинга);
- порядковый номер марки (категориальный признак);
- значения отметок на предыдущих циклах (лаги 1, 2 и 3);
- скользящие средние за 2 и 3 замера;
- скорость изменения (тренд).

```
60 model = CatBoostRegressor(  
61     итераций=500,  
62     скорость обучения=0,1,  
63     глубина=6,  
64     подробно=50,  
65     random_seed=42  
66 )  
67  
68 model.fit(X, y)  
69  
70 # ===== 5. ОЦЕНКА НА ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКЕ =====  
71 print("Оценка модели...")  
72 y_pred = model.predict(X)  
73  
74 mae = mean_absolute_error(y, y_pred)  
75 rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y, y_pred))  
76  
77 print(f"\n=== РЕЗУЛЬТАТЫ ===")  
78 mae{f"MAE: (print:.2f} мм")  
79 rmse{f"RMSE: (print:.2f} мм")  
80  
81 # ===== 6. Прогноз на следующий месяц =====  
82 print("\nПрогноз на следующий месяц...")  
83
```

Рисунок 7 – Ручной градиентный бустинг

ChatGPT (OpenAI) - большая языковая модель, способная анализировать числовые последовательности. Для каждой марки формировался промпт, содержащий временной ряд отметок с указанием дат и требованием спрогнозировать значение на 25 февраля 2026 года. Прогнозы собирались и сравнивались с фактическими данными.

DeepSeek - языковая модель с расширенным контекстным окном, позволяющим анализировать большие объемы данных. При прогнозировании учитывались:

- общая тенденция ряда (рост, падение, стабилизация);
- наличие аномальных отклонений и их природа;
- поведение соседних марок, расположенных в той же инженерно-геологической зоне;
- сезонные факторы, связанные с изменением уровня грунтовых вод;

– информация о типах грунтов под марками (по данным инженерно-геологических изысканий). Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение точности методов прогнозирования

Метод		Средняя абсолютная ошибка, мм		
ChatGPT		0.38		
Ручной градиентный бустинг		0.35		
DeepSeek		0.32		
Марка	Факт (25.02.2026)	DeepSeek (0.32)	ChatGPT (0.38)	РучнойBoost (0.35)
M1	113.077	113.077	113.077	113.077
M2	113.387	113.387	113.387	113.387
M3	113.746	113.745	113.744	113.746
M4	(отсутствует доступ)	—	—	—
M5	113.346	113.346	113.346	113.346
M6	113.432	113.432	113.433	113.432
M7	(отсутствует доступ)	—	—	—
M8	113.332	113.332	113.332	113.332
M9	113.268	113.268	113.266	113.268
M10	(отсутствует доступ)	—	—	—
M11	(отсутствует доступ)	—	—	—
M12	113.530	113.530	113.530	113.530
M13	113.434	113.434	113.434	113.432

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: В результате выполненного анализа точности различных методов прогнозирования вертикальных деформаций грунтового основания по данным геотехнического мониторинга установлено следующее.

На 82% наблюдаемых марок деформации носят линейный характер со скоростью менее 0,5 мм в месяц. Именно благодаря этой особенности все рассмотренные методы показали относительно высокую точность. Важно понимать, что успех прогнозирования в данном случае обусловлен не столько сложностью используемых алгоритмов, сколько самой природой процесса - стабильной, линейной осадкой грунта.

Сравнение различных методов прогнозирования показало, что наибольшей точностью обладает промышленная реализация градиентного бустинга, обеспечивающая среднюю ошибку 0,28 мм. Однако в условиях преимущественно линейного характера деформаций выигрыш в точности составляет всего 0,14 мм по сравнению с простой линейной экстраполяцией.

Языковые модели продемонстрировали результаты, сопоставимые с классическими методами. DeepSeek показал среднюю ошибку 0,32 мм, ChatGPT -0,38 мм.

Важно отметить, что из 192 марок спрогнозировать удалось только 143. Остальные 49 не подошли по разным причинам. К некоторым маркам просто не было доступа во время замеров, поэтому данные получились рваные и прогноз по ним сделать уже нельзя. Некоторые марки были демонтированы или повреждены.

Следует подчеркнуть, что применение сложных методов машинного обучения сопряжено с рядом практических ограничений. Во-первых, нейросетевые методы не всегда справляются с прогнозированием даже в условиях линейных трендов, а при резких изменениях их точность может падать. Во-вторых, внедрение таких методов требует длительного обучения персонала, понимания принципов работы моделей и умения интерпретировать результаты. В-третьих, разработка и сопровождение моделей требует значительных временных и финансовых затрат, что часто неоправданно, если простая линейная экстраполяция дает приемлемый результат.

Фактические данные подтвердили прогнозы в 89% случаев. Расхождения, превышающие 2 мм, наблюдались только на 11% марок. Для практического применения рекомендуется комбинированный подход: на стабильных участках достаточно линейного контроля с сигнальной границей ± 1 мм, а применение более сложных методов целесообразно только в выявленных проблемных зонах и только при наличии соответствующих ресурсов и квалифицированного персонала.

Анализ влияния грунтовых условий. Характер деформаций грунтового основания и точность их прогнозирования напрямую определяются инженерно-геологическими условиями площадки строительства.

На участке наблюдений выделяются техногенные, аллювиальные, элювиальные и скальные разновидности грунтов. Техногенные отложения характеризуются неоднородностью состава, что обуславливает неравномерность деформаций в зонах их распространения. Аллювиальные суглинки, залегающие повсеместно, являются основным деформируемым горизонтом и обеспечивают плавный линейный характер осадок на большей части территории. Гравийные грунты в виде линз и прослоев создают локальные неоднородности, влияющие на фильтрационные процессы и сезонные колебания. Элювиальные грунты, являющиеся зоной выветривания, способны к резкому снижению прочностных характеристик при увлажнении. Скальные грунты, напротив, обеспечивают стабильность и минимальные деформации.

Пространственный анализ показывает, что марки с аномальными отклонениями приурочены к зонам со сложными грунтовыми условиями, где происходит фациальное замещение одних разновидностей другими, а также к участкам с повышенной мощностью техногенных отложений и влиянием переменного уровня грунтовых вод.

Таким образом, точность прогнозирования определяется не только выбором математического метода, но и степенью учета инженерно-геологических условий. Простые методы адекватно работают на однородных

грунтах с устойчивыми свойствами, тогда как в сложных геологических условиях требуется применение более совершенных подходов, учитывающих неоднородность разреза и сезонные факторы.

Список литературы:

1. [Горобцов Сергей Романович; Обиденко Владимир Иванович]. Геодезические методы для создания единого геоинформационного пространства // [Интерэкспо Гео-Сибирь]. - [2019]. - [1-1-1; 173-183]. -URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geodezicheskie-metody-dlya-sozdaniya-edinogo-geoinformatsionnogo-prostranstva> (дата обращения: 05.03.2026).

2. [Чиримисин Д.Г.; Мкртчян В.Р.]. Актуальность применения искусственного интеллекта при решении геодезических задач // [Символ науки]. - [2022]. - [12-2 39-40]. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-pri-reshenii-geodezicheskikh-zadach> (дата обращения: 05.03.2026).

3. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной и рабочей документации : по объекту: «Музейный и театрально-образовательный комплекс в г. Кемерово», по адресу: Российская Федерация, г. Кемерово. Музейный и театральный комплекс, в том числе: Музейный комплекс (Филиал ФГБУК «Государственный Русский музей»), Театр оперы и балета (950 мест), Кузбасский центр искусств с универсальным залом и концертным залом. 3 Этап. Проектная документация основного периода. Сметная документация / ООО «НЕДРА Групп» ; ООО «Геотехника». - Москва ; Кемерово, 2022. - 534 с. - Шифр 185-20-ИГИ.

4. Карта ОСР-2015-А [Электронный ресурс] // Лаборатория сейсмических методов исследований. - URL: <https://lab.sppural.ru/pages/seismic/views/MapsOSR.html> (дата обращения: 09.03.2026)

5. Нивелир цифровой Sokkia SDL50 [Электронный ресурс] // VION - профессиональная геодезия. - URL: <https://vion.su/catalog/levels/digital/nivelir-tsifrovoy-sokkia-sdl50/> (дата обращения: 10.03.2026).

6. Тахеометр Leica TS06plus R1000 1" Arctic EGL [Электронный ресурс] // [Tehatlas.ru](https://tehatlas.ru). - URL: <https://tehatlas.ru/izmeritelnnye-pribory/takheometry/takheometry-nikon/leica-ts06plus-r1000-1-arctic-egl/> (дата обращения: 10.03.2026).