

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ «ИНСТИТУТ ГЕОЭКОЛОГИИ ИМЕНИ Е.М. СЕРГЕЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГЭ РАН)»

На правах рукописи

Романова Елизавета Романовна

**ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТИНА О ГОРОДА МОСКВЫ)**

1.6.7 – «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
Доктор геолого-минералогических
наук,
профессор
Хоменко Виктор Петрович

Москва – 2026

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Провалы земной поверхности представляют большую опасность для зданий и сооружений, особенно если они расположены на городских территориях. В разных странах мира распространено парагенетическое сочетание провалов, вызванных гравитационным обрушением кровли подземных полостей трех типов: а) имеющих карстовое происхождение; б) суффозионных; в) представляющих собой заброшенные горные выработки. В частности, такого рода явления неоднократно наблюдались в странах континентальной Европы и в Великобритании, где они наносят значительный материальный, социальный и экологический ущерб. При этом все три перечисленных генетических типа провалообразования редко рассматриваются в комплексе.

В настоящее время проблема комплексного изучения и оценки опасности этого парагенетического феномена остро встает в Москве в связи с расширением ее территории за счет включения Троицкого и Новомосковского административных округов (ТиНАО), где наблюдаются провальные явления рассматриваемого генезиса. На остальной территории Москвы такой проблемы не существует, поэтому действующие в городе инструктивные и методические документы, составленные до расширения ее территории, ограничиваются только регламентацией оценки карстово-суффозионной опасности техногенного происхождения, уровень которой в последние десятилетия резко снизился.

Места сосредоточения провалов, формирование которых обусловлено карстом, суффозией и подработкой территорий, представляют собой участки повышенного риска возникновения чрезвычайных ситуаций различного характера, поскольку в пределах таких участков велика вероятность образования новых форм рельефа аналогичного генезиса. На территории ТиНАО поиск и идентификация этих феноменов осложнена присутствием искусственно созданных замкнутых понижений земной поверхности, имеющих иную природу. Кроме того, эта территория в значительной мере покрыта древесной и кустарниковой растительностью. Все это затрудняет оценку опасности образования провалов, причем в данной ситуации неприменимы подходы, отработанные для этой цели на остальной территории Москвы.

Степень разработанности темы исследования:

Исследования касающиеся использования ЦМР, построенной по результатам лидарной съемки, для оцифровки локальных понижений рельефа представлены в работах: Т.В. Орлова; С.А. Садко; J. Guerrero; Sevil J. ; Desir G. ; J. Zhu; S. Steel; Taylor T.P. ; Currens J.C. ; Bevis Kenneth A.; Alexander S.C., Rahimi M.H.; и Larson E.B.

Исследования, касающиеся разработки методик оцифровки понижений рельефа по ЦМР, представлены в работах: Е.В. Поляковой; Ю.Г. Кутинова; Wang L.; Liu H.; Lindsay J.B.; Creed I.F.; Fisher P.; Tate N.; Oksanen J.; Sarjakoski T.; Carvalho Júnior и Mark D.M.

Исследования, касающиеся изучения закарстованности г. Москвы и Московской области представлены в работах: В.М. Кутепова; В.Н. Кожевниковой; А.В. Аникеева; А.Д. Кочева; И.В. Козляковой; И.А. Кожевниковой; Н.В. Макаровой и С.В. Григорьевой.

Цель диссертационного исследования – на примере ТиНАО г. Москвы разработать принципы оценки опасности образования провалов, связанных с карстом, суффозией и подработкой территорий, путем специальной обработки данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, позволяющей выявлять и генетически идентифицировать замкнутые понижения на земной поверхности.

Достижение цели сводилось к решению следующих задач:

1. на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 0,2 м/пикс разработать автоматизированную методику оцифровки локальных понижений рельефа;
2. разработать методику выявления артефактов (ошибок) ЦМР;
3. разработать методику генетической идентификации локальных понижений рельефа с использованием различной дополнительной информации;
4. провести полевые исследования для уточнения происхождения некоторых понижений;
5. разработать методику районирования территории ТиНАО по степени опасности образования провалов, связанных с карстом, суффозией и перемещением грунта в полости заброшенных горных выработок.

Объектами исследования являются выявленные в результате автоматизированной оцифровки локальные понижения рельефа.

Фактический материал получен в ходе полевых исследований территории ТиНАО в 2023-2025 гг. Также в работе использованы материалы дистанционного зондирования Земли и данные трехмерной цифровой геологической модели г. Москвы ГБУ «Мосгоргеотрест».

Научная новизна исследований

1. Разработана и апробирована автоматизированная методика оцифровки локальных замкнутых понижений земной поверхности по данным ЦМР. Методика использует инструменты анализа, предоставляемые открытыми свободно распространяемыми геоинформационными системами (ГИС).

2. Разработана и апробирована методика предварительной генетической идентификации выявленных понижений. Методика включает использование архивных топографических карт, информации о подземных горных выработках, данных об объектах археологического интереса, информации о проводившихся на территории строительных работах и других видах антропогенного вмешательства в природный ландшафт.

3. Выявлен ранее не характерный для территории г. Москвы, но типичный для ТиНАО, агент опасности провалообразования – заброшенные подземные горные выработки (подземные каменоломни).

4. Разработана методика районирования территории по опасности провалообразования на основе: данных о замкнутых понижениях земной поверхности природного происхождения и образовавшихся в результате перемещения грунта в полости заброшенных каменоломен, данных о подработке территорий, которая не отражается в современном рельефе и данных о геологическом строении территории.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов работы заключается в расширении существующих представлений об условиях проявления парагенетического феномена образования провалов, вызванных обрушением кровли карстовых полостей, суффозионных полостей и заброшенных горных выработок. При этом был разработан научно обоснованный подход к комплексной оценке опасности этого феномена для зданий и сооружений.

Практическая значимость и реализация результатов работы заключается в том, что предлагаемые методические разработки позволяют осуществлять автоматизированный поиск замкнутых понижений земной поверхности путем анализа цифровых моделей рельефа, определять их генезис и районировать территорию будущей застройки по степени опасности провалообразования, обусловленного обрушением кровли карстовых полостей, суффозионных полостей и заброшенных горных выработок.

Основные методы исследований. На эмпирическом уровне методология исследований включала поиск и идентификацию провалов земной поверхности, накопление и отбор соответствующих фактов, установление причинно-следственных связей между ними. На теоретическом уровне осуществлялся анализ и синтез полученного фактического материала на основе комплексного подхода к рассмотрению изучаемых феноменов, как имеющих разную природу, но схожий конечный результат. В итоге был сделан индуктивный вывод о возможности минимизации ожидаемых негативных последствий градостроительного освоения провалоопасных территорий путем предвидения этих последствий. При решении поставленных задач использовались методы дешифровки

данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, полевые рекогносцировочные работы, анализ разнообразных архивных материалов и других источников информации.

Из всего вышеописанного следуют следующие **защищаемые положения**:

1. Цифровая модель рельефа с разрешением 0,2 м/пикс позволяет с использованием алгоритмов анализа геоинформационных систем осуществлять автоматизированный поиск локальных замкнутых понижений земной поверхности с отбраковкой артефактов. Это способствует минимизированию объемов рекогносцировочных маршрутов и увеличению степени достоверности данных о пораженности поверхности провальными явлениями.
2. Помимо карстового и суффозионного процессов подземные горные выработки (подземные каменоломни) могут являться причиной образования провалов на территории Троицкого и Новомосковского округов (ТиНАО) г. Москвы, что необходимо учитывать при районировании территории по степени опасности провалообразования.
3. Методика оценки опасности провалообразования включает последовательность операций по анализу данных дистанционного зондирования Земли, рекогносцировочному обследованию территории и сбору дополнительной информации в соответствии с определенным алгоритмом.

Апробация работы

Отдельные разделы работы были представлены автором на конференциях:

- Научная конференция. Сергеевские чтения XXIV. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. (ИГЭ РАН, Казань, 2023 г.);
- Научная конференция. Сергеевские чтения XXV. Региональная инженерная геология и геоэкология (ИГЭ РАН, Дербент, 2024 г.);
- ГеоИнфо & Expo 2024;
- Всероссийской научно-практической конференции «Гидрогеологические, инженерно-геологические и эколого- геологические исследования» (ВГУ, г. Воронеж, 2024 г.);
- ГеоИнфо & Expo 2025;
- Научная конференция. Сергеевские чтения XXVI. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества. (ИГЭ РАН, Псков, 2025 г.).

Публикации автора по теме диссертации

Результаты проведенных исследований изложены в 18 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях по специальности 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки)»:

- Инженерная геология (том XVIII 4/2023);
- Вестник Пермского университета (том 24, №1);
- Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология (№2, 2025);
- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов (№8, 2025).

Личный вклад автора заключается в разработке методики по автоматизированной оцифровке замкнутых понижений рельефа и методики по выявлению артефактов (ошибок) ЦМР; участии в полевых выездах для апробации методики с проведением измерений морфометрических параметров понижений совместно с сотрудниками ГБУ «Мосгоргеотрест», сотрудниками ГПБУ «Мосэкомониторинг» и Института геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН; в разработке методики районирования территории по опасности провалообразования с учетом опасности образования провалов над подземными горными выработками.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 105 наименований и двух приложений. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, включает 92 рисунка и 5 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе проанализированы исследования использующие открытые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные по данным лазарной съемки, для поиска и установления происхождения локальных понижений рельефа. Также в главе анализируются работы содержащие исследования заброшенных подземных горных выработок, и работы, включающие оценку опасности перемещения грунта в их полости.

Выводы к главе 1:

1. Открытые данные ДЗЗ не подходят для идентификации локальных понижений земной поверхности размером менее 30 м, для этого необходимо использовать данные более высокого разрешения;
2. ЦМР позволяет проводить автоматизированную оцифровку понижений на залесенных территориях, а также позволяет определять их глубину, а при наличии разновременных съемок даже проводить мониторинг;
3. Для проведения районирования территории по опасности образования провалов, вызванных обрушением кровли полостей, заброшенных подземных горных выработок,

принято использовать информацию о пространственном расположении полостей в массиве грунтов и информацию о состоянии шахт.

ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ, КОТОРЫЕ МОГЛИ ВЫЗВАТЬ ПОЯВЛЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ПОНИЖЕНИЙ РЕЛЬЕФА НА ТЕРРИТОРИИ ТИНАО

В главе рассматриваются процессы, которые могли привести к образованию локальных понижений рельефа на территории ТиНАО свободной от современной застройки. Среди основных таких процессов были выделены: карст, суффозия, подработка территорий (перемещение грунта в полости заброшенных горных выработок), поверхностная экскавация грунтов, военные действия.

Рассмотрены исследования поверхностной закарстованности г. Москвы и Московской области (к которой ранее относилась территория ТиНАО). На основе литературы определено местоположение известных карстопроявлений на территории ТиНАО и составлена схема их расположения. Рассмотрены основные суффозионные формы рельефа. Собрана информация об известных на территории ТиНАО спелеологических участках (СпУ), составлена схема их расположения. Рассмотрена проблема экскавации грунтов в результате строительной деятельности, а также в результате поиска артефактов на участках археологического интереса.

На территории ТиНАО за последние два века дважды проходили боевые действия. Во время Великой Отечественной войны на южной окраине ТиНАО шли наземные сражения. А воздушное пространство повсеместно было полем боевых действий, поэтому на территории можно обнаружить воронки от авиационных бомб, которые зачастую имеют вал по периметру.

Выводы к главе 2:

1. Территория ТиНАО характеризуется значительной продолжительностью антропогенного освоения. В течение столетий хозяйственная деятельность человека могла привести к существенным изменениям природного рельефа. Часто старые антропогенные понижения по морфометрическим характеристикам неотличимы от понижений природного генезиса. Для корректного установления генезиса понижений и составления рациональной программы полевых исследований необходимо использовать максимально полный комплекс архивных и историко-картографических материалов, позволяющих реконструировать этапы освоения территории.

2. Заброшенные подземные горные выработки (каменоломни) представляют собой техногенные полости в карбонатных породах. Обрушение кровли этих выработок может спровоцировать процесс перемещения вышележащих отложений в полости. Данный

механизм является причиной формирования провалов на дневной поверхности на территории ТиНАО, что подтверждают спелеологи.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДУЕМОГО УЧАСТКА

Для достижения цели были поставлены задачи, которые можно представить в виде 5 этапов:

Этап 1. Автоматизированное выявление и извлечение морфометрических параметров бессточных впадин.

Разрабатываемая методика оцифровки впадин базируется на применении стандартных алгоритмов анализа, доступных в свободно распространяемых ГИС. Использование уже существующих инструментов анализа и алгоритмов является методически оправданным, так как позволяет сосредоточиться не на создании новых алгоритмов, а на их адаптации и интеграции в целевой рабочий процесс для решения конкретной задачи. Ключевым требованием к методике является возможность автоматического извлечения из ЦМР для каждого понижения его размеров в плане, формы и глубины.

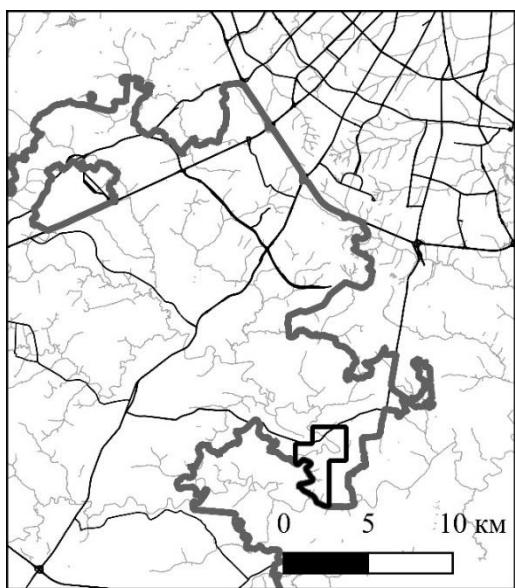
Этап 2. Выявление ложных впадин (ошибочных понижений ЦМР). На этом этапе необходимо разработать методику выявления и удаления артефактов (ошибок ЦМР), это позволит повысить достоверность получаемой информации, существенно сократить объем последующих трудоемких камеральных и полевых исследований, сконцентрировавшись на анализе реально существующих форм рельефа.

Этап 3. Камеральная генетическая классификация впадин. Этап предусматривает разработку экспертной методики определение генезиса понижений. Установление происхождения проводится на основе комплексного анализа всей доступной ретроспективной информации: истории антропогенного освоения территории, архивных картографических материалов, данных предыдущих исследований и разновременных космических снимков. Разработанный алгоритм должен обеспечить не только классификацию объектов по генезису объектов (карстовые, суффозионные, техногенные и пр.), но и их ранжирование по приоритетности для полевой верификации.

Этап 4. Полевая верификация. На этапе осуществляется натурная проверка результатов дистанционного анализа. В ходе полевых выездов проводится детальное обследование и фотофиксация ключевых понижений для подтверждения, уточнения или корректировки их установленного на этапе 3 генетического типа.

Этап 5. Районирование по степени опасности провалообразования. На завершающем этапе на основе всех полученных данных разрабатывается и апробируется методика районирования территории по опасности провалообразования. Методика использует критерии оценки опасности провалообразования от различных процессов: карстового, суффозионного и связанного с перемещением грунта в полости каменоломен. Результатом является карта районирования ключевого участка по степени опасности провалообразования.

Решение поставленных задач и апробация разрабатываемых методик выполняются на ключевом участке площадью 8,01 км², выбранном в пределах ТиНАО. Исследуемый участок расположен на востоке Новомосковского административного округа (рисунок 1). Участок пересекают р. Десна и р. Пахра.



Условные обозначения

- граница ТиНАО
- граница участка исследования
- гидрографическая сеть
- наиболее крупные элементы автодорожной сети

Рисунок 1. Схема расположения участка исследования

В геологическом строении территории принимают участие отложения четвертичной, юрской и каменноугольной системы. Отложения меловой системы отсутствуют.

Отложения четвертичной системы распространены практически на всей исследуемой территории, представлены: техногенными отложениями (*t H*); современными четвертичными аллювиальными отложениями (*a H*); покровными отложениями (*L III – H*); аллювиальными отложениями первой надпойменной террасы (*a1 IIIms – os*); аллювиальными отложениями второй надпойменной террасы (*a2 IIIkl*); аллювиальными и гляциофлювиальными отложениями третьей надпойменной террасы (*a, f3 IIms*); гляциофлювиальными и гляциолимническими (ледниково-озерными) отложениями времени отступания ледника (*f, lg II ms*); нерасчлененными гляциофлювиальными и гляциолимническими (ледниково-озерными) отложениями Донской и Московской морен (*f, lg I ds – II ms*); гляциальными (ледниковыми) отложениями донской морены (*g I ds*) и гляциофлювиальными отложениями сетуньско-донской свиты (*fI st – ds*).

Отложения мезозоя представлены только юрской системой. Абсолютные отметки кровли юрских отложений изменяются от 117 м до 160 м. Система представлена

отложениями титонского яруса $J_3\text{tt}$ и оксфордского яруса $J_3\text{o}$. Отложения юрской системы размыты в долине р. Десны и Пахры. На таких участках на закарстованных каменноугольных отложениях сразу залегают четвертичные связные и несвязные отложения.

На интересующую глубину исследования отложения кайнозоя представлены лишь грунтами среднего отдела каменноугольной системы. Абсолютные отметки кровли каменноугольных отложений изменяются от 123 м до 150 м. Каменноугольные отложения представлены известняками и доломитами различной степени трещиноватости. Глубина залегания кровли каменноугольных отложений достигает 35 м (рисунок 2).

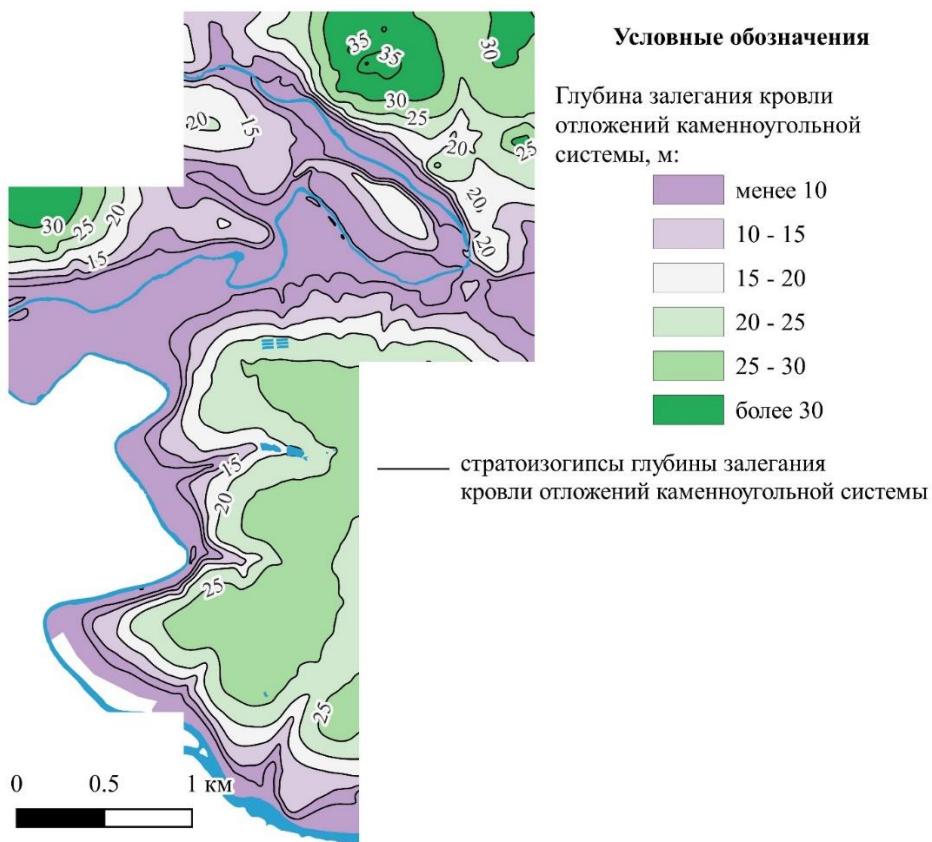


Рисунок 2. Карта глубины залегания кровли каменноугольных отложений, построенная по данным трехмерной геологической модели ГБУ “Мосгоргеотрест”.

Согласно архивным данным на исследуемом участке в долинах рек распространены суффозионно-неустойчивые грунты, а также эти участки опасны в отношении возможности развития карстово-суффозионных процессов. Установленных карстово-суффозионных воронок и западин на участке исследования нет.

Вывод к главе 3

Условия для развития карста (неглубокое залегание карбонатных пород, отсутствие или малая мощность юрских глин в долинах рек) создают предпосылки для формирования карстовых воронок. Дополнительными факторами риска являются распространение

суффозионно-неустойчивых грунтов, способствующих просадкам, и наличие заброшенных подземных выработок. Совокупность этих факторов определяет целесообразность разработки на примере данного участка: методики автоматизированного выявления бессточных впадин, методики их генетической идентификации и методики районирования территории по степени опасности провалообразования.

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦИФРОВКА ЛОКАЛЬНЫХ ЗАМКНУТЫХ ПОНИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

В работе автор использует ЦМР, построенную по результатам съемки, проведенной ГБУ «Мосгоргеотрест» в 2022 г. Разрешение используемой ЦМР составляет 0,2 м/пикс, что является компромиссом между точностью результатов и производительностью вычислительных работ.

Поиск понижений рельефа проводился исключительно на незастроенных территориях, поскольку в зонах активной хозяйственной деятельности подобные формы, как правило, нивелируются. Общая площадь анализируемой территории составила 4,3 км².

Цифровые модели рельефа в их исходном виде часто содержат ошибки. Ошибки можно подразделить на ошибочные повышения и ошибочные понижения. Ошибочные понижения называют «приемниками», приемник – это ячейка или группа ячеек, окруженная большими значениями высоты, он также называется «локальное понижение», или «впадина». В качестве впадин на ЦМР могут выступать существующие элементы рельефа и артефакты ЦМР, наличие которых обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты.

Так как практически все инструменты анализа для оцифровки понижений ЦМР представлены проприетарными программными пакетами, автором данной работы разработан свой алгоритм использования инструментов анализа, предоставляемых только свободно распространяемыми ГИС (QGis, SAGAGis).

Исходная ЦМР была подвергнута сглаживанию при помощи алгоритма Resampling Filter программы SAGAGis (рисунок 3.а), эмпирическим путем масштаб сглаживания был принят равным 10 (scale 10). В результате чего все понижения небольшой площади были снивелированы (рисунок 3.б). Затем, путем попиксельного вычитания из сглаженного растра исходной ЦМР, была получена матрица числовых значений, характеризующая разницу отметок истинного рельефа относительно условно гладкой поверхности (рисунок 3.в). На следующем шаге были оцифрованы участки сглаживания которых повысило отметки рельефа на 0,3 м и более (рисунок 3 г).

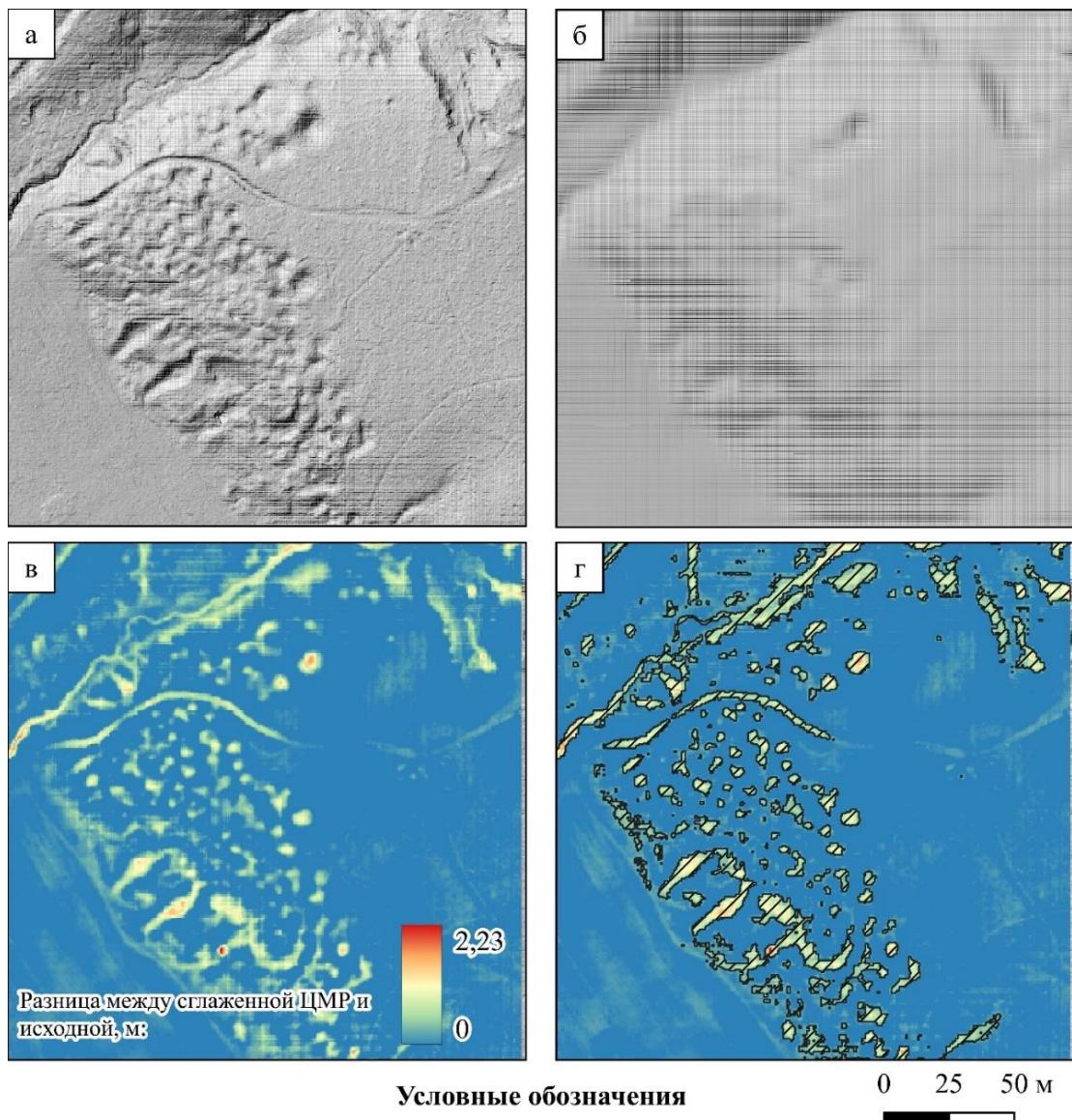


Рисунок 3. а – исходная цифровая модель рельефа; б – сглаженная ЦМР при помощи Resampling Filter (scale 10) ЦМР; в – растр полученный при вычитании из сглаженной ЦМР исходной; г – области с сглаживанием 0,3 м и более.

Границы замкнутых понижений, выделенных на данном этапе не являются окончательными границами самих понижений. Это обусловлено работой алгоритма сглаживания и особенностями применяемой методики. Поэтому вокруг выделенных на предыдущем этапе областей была построена буферная зона 5 м (рисунок 4.а). Все участки в ее границах – область дальнейшей обработки. Затем в границах этой зоны были построены изолинии ЦМР с интервалом 0,1 м, и для всех была предпринята попытка трансформации в полигоны. Незамкнутые изолинии не преобразовались, и на выходе алгоритм выдал только замкнутые бессточные впадины (рисунок 4.б).

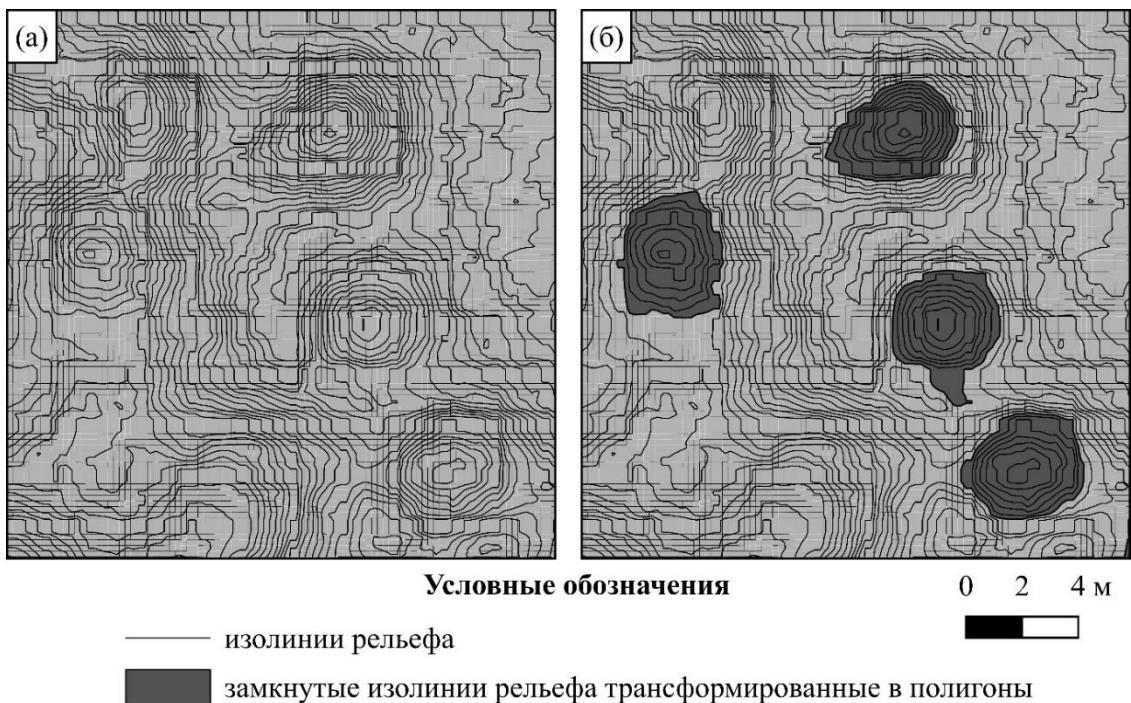


Рисунок 4. а – граница области интереса, являющаяся границей буферной зоны 5 м вокруг областей сглаживания 0,3 м и более; б – полигоны, полученные путем трансформации замкнутых изолиний рельефа в границах области интереса.

На данном этапе было решено в качестве одного из морфометрических параметров для фильтрации использовать критерий близости формы полигона к кругу, так как искомые понижения скорее имеют окружную форму. Для этого был введен безразмерный коэффициент окружности Коха (Кокса) k . Изначально этот коэффициент был разработан для оценки близости формы зерен песчаных грунтов к сферической, но он также применим для анализа плоских фигур. Коэффициент Коха в случае определения близости формы полигона к кругу определяется по формуле:

$$k = \frac{4\pi S}{l^2},$$

где S и l – площадь фигуры и ее периметр, вычисленные при помощи ГИС. Чем ближе значение k к 1, тем более круглым является полигон.

Путем подбора порогового значения k из выборки были исключены объекты со значением коэффициента менее 0,5.

Для всех понижений с использованием ГИС были вычислены следующие параметры: абсолютная отметка верха понижения H_v (абсолютная отметка замкнутой изолинии по которой производилось построение границы полигона); абсолютная отметка дна H_d (минимальная абсолютная отметка земной поверхности в пределах полигона); глубина h (определялась как разница между абсолютной отметкой верха и дна понижения);

После выполнения описанных операций, было получено 12215 полигонов глубиной от 1 см до 1,64 м. На этапе заключительной фильтрации был использован порог по глубине: в итоговую выборку вошли понижения глубиной более 0,3 м, что составило 1644 полигона.

Многие из этих полигонов являются артефактами – ошибками. Для их выявления автор использовал исходные данные, по которым строилась ЦМР. В границах артефактов плотность исходных данных значительно меньше окружающей его территории. В связи с этим было принято решение выявлять артефакты на основе анализа средней плотности данных на 1м². Фильтрация проводилась путем сравнения средней плотности данных на природной территории с плотностью данных внутри каждого полигона. Эмпирически было решено, что к реальным понижениям следует относить только те объекты, плотность данных внутри которых либо превышает среднюю плотность на природной территории, либо меньше её, но не более чем в три раза.

В результате было отобрано 361 полигона, интерпретированных как реальные формы рельефа. 1252 полигона были классифицированы как артефакты ЦМР.

Выводы к главе 4

1. ЦМР с разрешением 0,2 м/пикс позволяет с применением стандартных алгоритмов, доступных в свободно распространяемых ГИС, проводить автоматизированную оцифровку локальных понижений рельефа.

2. Предложенный метод фильтрации полигонов – сравнение плотности исходных данных в пределах понижений и на окружающей природной территории – позволил эффективно выявлять артефакты ЦМР, доля которых составила более 75%. Такая фильтрация существенно повышает качество и достоверность полученных данных для дальнейшего исследования.

ГЛАВА 5. УСТАНОВЛЕНИЕ ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПОНИЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ

Методика установление предположительного происхождения понижений по данным ДЗЗ и архивной информации

Предположить происхождение понижений можно на основе анализа архивных топографических карт, военных карт, а также сведений краеведческих музеев, данных спелеостолологических исследований и информации об объектах археологического наследия.

В рамках данного исследования было решено выделить следующие генетические виды понижений:

1. понижение, образованное в результате *перемещения грунта в полости заброшенных подземных горных выработок*;
2. понижение, образованное вследствие *антропогенной деятельности*,
3. понижение, скорее всего, *карстового или супфазионного* происхождения.

Понижение определяется как образованное в результате *перемещения грунта в полости заброшенных подземных горных выработок*, если оно соответствует *одному из* критериев:

- располагается в границах известного спелеостолического блока (СпБ);
- располагается на участке с признаками добычи камня (на участке по данным ДЗЗ видны точильные рвы и т.д.), но данных о подземных горных выработках нет;
- расположено на участке с аномально высокой плотностью понижений земной поверхности на высоких берегах рек, отсутствуют данные о подземных горных выработках, отсутствуют точильные рвы по данным ДЗЗ, отсутствует современная антропогенная деятельность.

Понижение определяется как образованное вследствие *антропогенной деятельности*, если оно соответствует *одному из* критериев:

- располагается на участке современной антропогенной деятельности (устанавливается по данным OSM и аэрофотоснимкам);
- располагается на дорогах, тропинках, в границах придорожных канав или в непосредственной близости от них;
- имеет форму квадрата/прямоугольника;
- понижения расположены системно, (например, выстраиваются в линию);
- имеет в непосредственной близости локальное повышение рельефа;
- имеет вал по периметру;
- расположено в границе объектов археологического наследия или археологических объектов иного статуса.

Понижение классифицируется как *вероятно карстового или супфазионного* происхождения при выполнении *всех* следующих условий:

- располагается на участке, где мощность перекрывающих глинистых отложений над закарстованным горизонтом не превышает 20 м (по данным о геологическом строении);
- глубина понижения составляет более 0,4 м;
- нет данных о неразличимых в современном рельефе объектах археологического интереса;

- на участке отсутствует современная строительная деятельность;
- нет информации о добыче камня.

Полевая верификация результатов

Благодаря спелеостолетическим исследованиям было установлено, что в границах участка исследования находится четыре спелеостолетических участка (СпУ) и девять спелеостолетических блоков (СпБ): Алхимовский (Алхимовский-1 и Верхнедевятояковский СпБ), Девятояковский (Нижнедевятояковский и Рыбинский СпБ), Еринский (Верхееринский, Среднееринский и Нижнееринский СпБ) и Сальковский (Верхнесальковский и Нижнесальковский СпБ). Семь СпБ идентифицируются по ЦМР, а два – нет. На рисунке 5 представлены ЦМР Верхнееринского и Среднееринского СпБ.

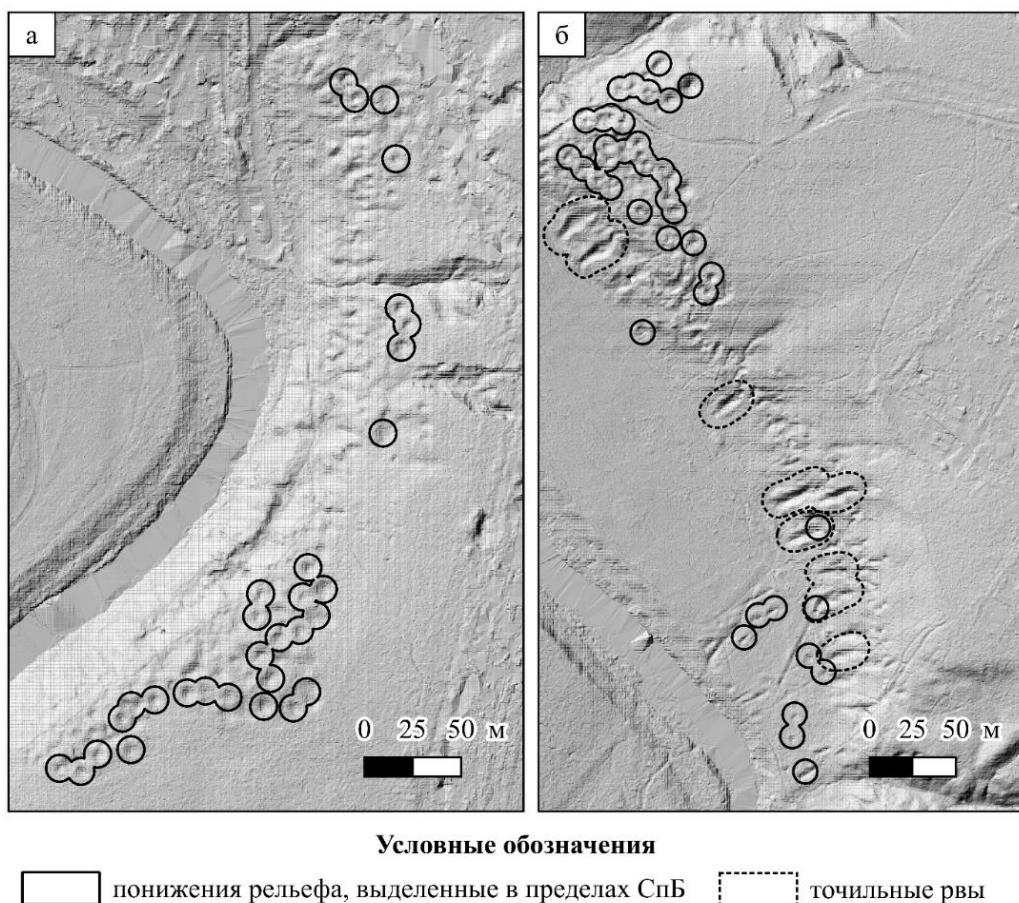


Рисунок 5. ЦМР разрешением 0,2 м/пикс: а – Верхнееринского СпБ; б – Среднееринского СпБ.

В границах всех СпБ выявлено 155 понижений, классифицированных как образованные в результате перемещения грунта в полости подземных горных выработок. Максимальные и минимальные линейные размеры, а также максимальная глубина понижений для каждого СпБ представлены в таблице 1. На рисунках 6 и 7 представлены фотографии понижений Рыбинского СпБ. На рисунке 8 представлена фотография понижений Среднееринского СпБ.

Таблица 1. Количество понижений и их размеры для каждого СпБ

Название СпБ	Количество понижений в границах СпБ	Размеры понижений в плане		Максимальная глубина понижений, м
		от	до	
Алхимовский -1	5	2,3×3,8 м	5,7×7,5 м	1,70
Рыбинский	25	1,1×1,2 м	7,5×10,9 м	1,9
Верхнееринский	31	2,5×3,9 м	9,6×13,7 м	0,95
Среднееринский	41	1,2×1,3 м	9,5×12,7 м	2,56
Нижнееринский	27	1,8×2,4 м	4,6×6,8 м	1,00
Верхнесальковский	26	1,9×2,6 м	6,2×7,3 м	1,7



Рисунок 6. Предположительно, шурф, заложенный исследователями Рыбинских каменоломен. Фото Жидкова Р.Ю. (май 2024 г)



Рисунок 7. Понижения земной поверхности, образованные перемещением грунта в штреки Рыбинских каменоломен. Фото Жидкова Р.Ю. (май 2024 г)



Рисунок 8. Понижения рельефа, образованные в результате перемещения грунта в полости каменоломен Среднееринского СпБ. Фото Романовой Е.Р. (ноябрь 2024 г)

В процессе полевых выездов был выявлен участок развития суффозии. Этот участок является местом обитания бобров, о чем свидетельствуют поваленные и погрызенные деревья. Норы бобров представляют собой пустоты в грунтах, слагающих речной берег, эти

пустоты могут являться областями, в которые выносится грунт, т.е. норы могут привести к активизации супфозии и образованию провалов.

Эта предположение подтверждается тем, что в результате полевого выезда в 2025 г. было отмечено увеличение числа поноров, некоторые из которых имеют каналы, уходящие под земной поверхностью в сторону реки, как перпендикулярно ей, так и под углом. Длина таких каналов доходит до 2 м.

В результате проведенной классификации и заверочных полевых работ на участке исследования было выделено 6 понижений рельефа, которые с наибольшей вероятностью являются результатами деятельности карста. Их размеры составляют от $2,0 \times 2,7$ м до $3,6 \times 4,1$ м, а глубина изменяется от 0,5 м до 0,9 м.

Выводы к главе 5

1. Территории, не затронутые современной застройкой, также могли подвергаться значительной антропогенной трансформации в прошлом, что существенно осложняет диагностику происхождения депрессионных форм.
2. Используя всю доступную информацию о техногенной трансформации местности, можно установить происхождение многих понижений.
3. Понижения, образованные вследствие перемещения грунта в полости подземных заброшенных горных выработок, могут достигать в диаметре 10 м и более. При этом не все каменоломни проявляются в современном рельефе. В отсутствие данных об их расположении каменоломни могут остаться невыявленными даже в ходе инженерно-геологических изысканий (включая бурение). Это создает риск активизации провалообразования в процессе строительства или эксплуатации объектов. Следовательно, районирование территории по степени опасности провалообразования должно выполняться с учётом данных о расположении подземных горных выработок.

ГЛАВА 6. РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

Методика районирования территории по опасности провалообразования основана на составлении синтетической карты опасности путем наложения двух карт:

1. карты районирования территории по карстовой опасности;
2. карты районирования территории по степени опасности образования провалов, вызванных перемещением грунта в полости каменоломен.

Районирование территории по карстовой опасности

Для построения карты районирования ТиНАО по степени карстовой опасности необходимо использовать критерии, которые можно получить из уже существующей архивной информации без проведения дополнительных исследований. Среди таких критериев районирования наиболее легко оцениваемым без дополнительных изысканий является, бесспорно, мощность глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт. Предлагается использовать при районировании территории по мощности глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности закарстованный горизонт следующие интервалы: менее 3 м; 3-10 м; 10 и более м (рисунок 9.а).

Вторым используемым параметром для районирования территории по степени карстовой опасности является удаленность от известных проявлений карста. Предлагается использовать следующие значения удаленности: менее 50 м; от 50 до 100 м; более 100 м (рисунок 9.б).

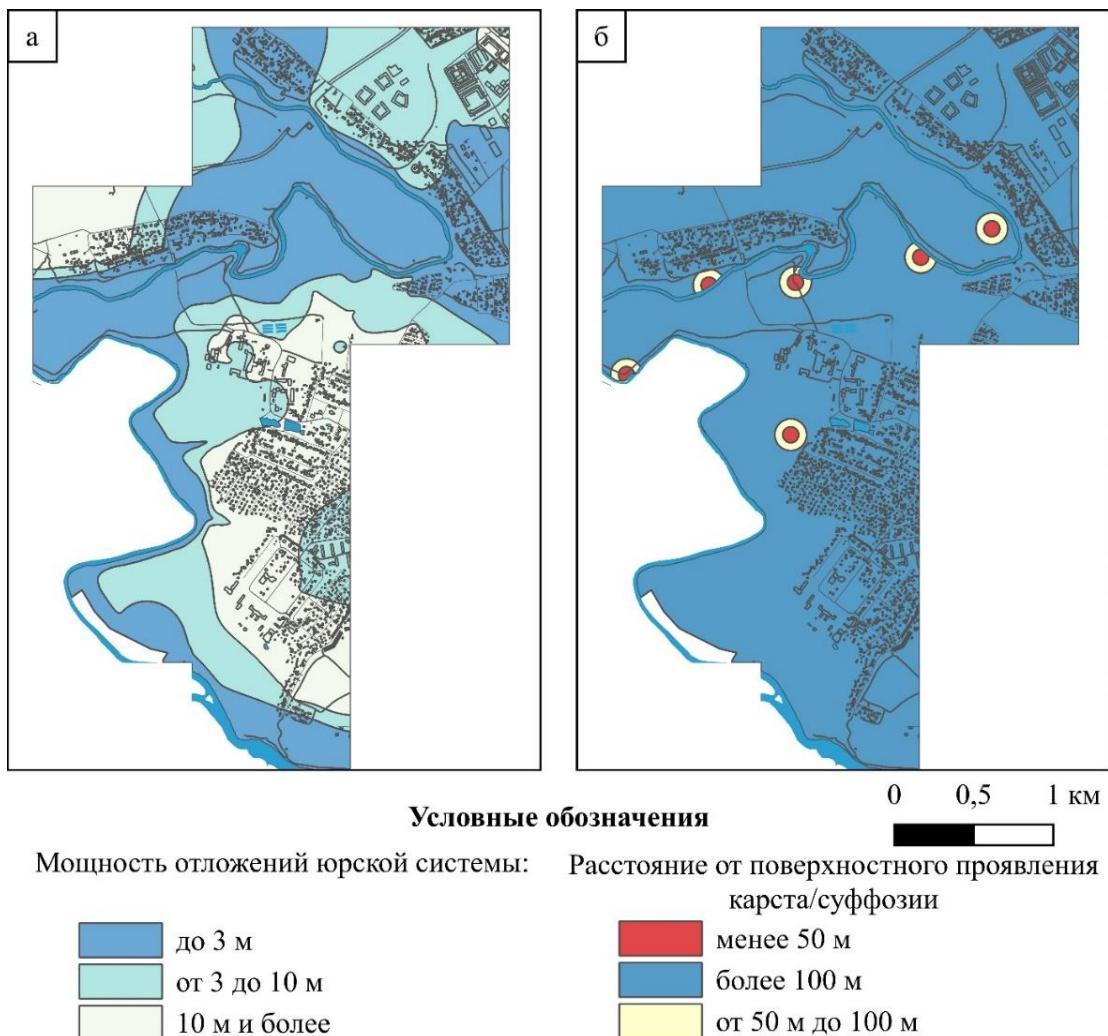


Рисунок 9. а – карта районирования территории по мощности глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности закарстованный горизонт; б – карта районирования территории по удаленности от ближайшего поверхностного проявления карста

На основе карт районирования по мощности экранирующих глинистых отложений и удаленности от ближайшего карстово-суффозионного проявления путем наложения одной карты на другую была построена результирующая синтетическая карта районирования территории по степени карстовой опасности. Каждый участок такой синтетической карты имеет две характеристики: мощность глинистых перекрывающих отложений и удаленность от ближайшего поверхностного карстово-суффозионного проявления. В зависимости от их сочетания участку присваивалась категория опасности в соответствии с таблицей 2. Итоговая карта районирования территории по карстовой опасности представлена на рисунке 10.

Таблица 2. Районирование территории по карстовой опасности

Мощность перекрывающих глинистых отложений, м	Расстояние от ближайшего проявления, м		
	менее 50	от 50 до 100	более 100
менее 3	опасная	опасная	потенциально опасная
от 3 до 10	опасная	потенциально опасная	потенциально опасная
более 10	потенциально опасная	неопасная	неопасная

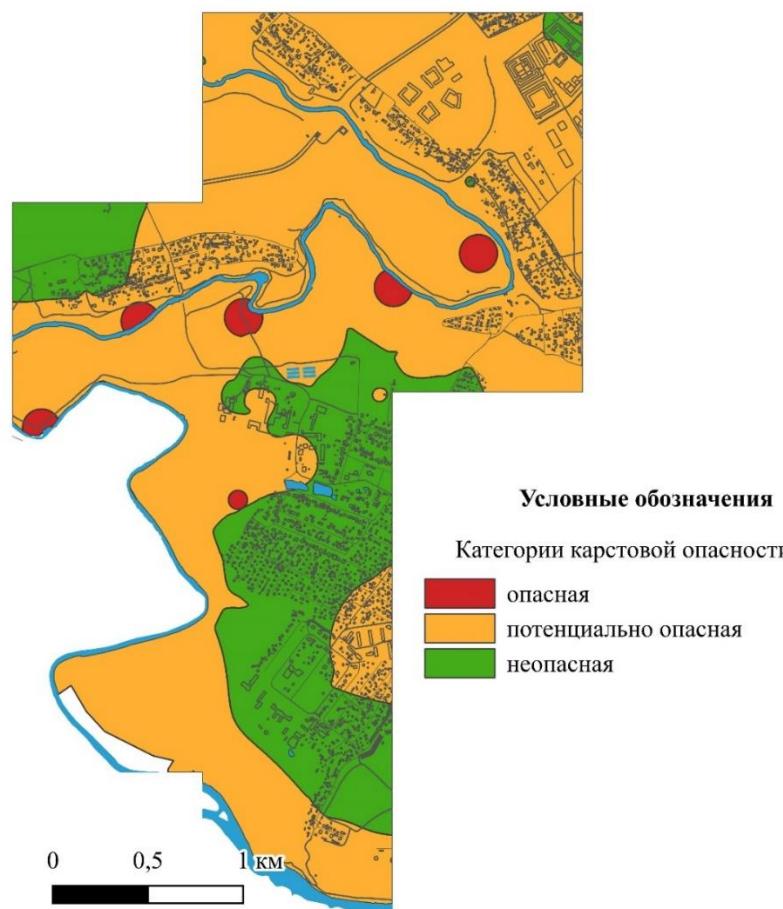


Рисунок 10. Карта районирования территории по карстовой опасности

Районирование территории по опасности перемещения грунта в полости заброшенных каменоломен

Каменоломни являются одним из агентов провалообразования на территории ТиНАО. Трудность учета вероятности перемещения грунта в их полости заключается в отсутствии архивных топографических съемок, недостаточном количестве данных о их расположении и физической невозможности получения этой информации.

Предлагается классифицировать СпБ в зависимости от наличия или отсутствия поверхностных понижений, образованных обрушением кровли штреков каменоломен, и выделить два типа СпБ:

1. *СпБ реализованной опасности* – в границах СпБ присутствуют локальные понижения земной поверхности;
2. *СпБ нереализованной опасности* – в границах СпБ отсутствуют локальные понижения земной поверхности.

Для каждого типа СпБ был разработан свой метод районирования территории по опасности образования провалов.

Районирование по опасности провалообразования СпБ реализованной опасности

На территории ТиНАО подземные горные выработки могли иметь несколько входов в систему полостей, полной информации о пространственном расположении которой нет. Поэтому для районирования по опасности провалообразования в границах СпБ реализованной опасности предлагается использовать максимальное расстояние между зафиксированными понижениями (L_{max}) в границах СпБ. Для этого необходимо провести триангуляцию, используя в качестве вершин треугольников центры понижений, рассчитать длины сторон и определить максимальное расстояние в пределах СпБ.

При районировании территории по степени опасности образования провалов в результате перемещения грунта в полости каменоломен (для СпБ реализованной опасности) предлагается выделять следующие категории:

- **Весьма опасная категория** – удаленность от известных локальных понижений составляет до 0,5 L_{max} ;
- **Опасная категория** – удаленность от известных локальных понижений составляет от 0,5 до 1,0 L_{max} ;
- **Потенциально опасная категория** – удаленность от известных локальных понижений составляет от 1,0 до 1,5 L_{max} ;
- **Неопасная** – удаленность от известных локальных понижений составляет более 1,5 максимального расстояния между понижениями.

Районирование по опасности провалообразования СпБ нереализованной опасности

Каменоломни в границах СпБ нереализованной опасности, скорее всего, существуют, некоторые, как например, Силикаты-1 (Нижнедевятовский СпБ) изучены, но обрушение штреков либо еще не произошло, либо минимальны, и не привели к образованию понижений на земной поверхности. Поэтому при районировании данных СпБ предлагается использовать три общепринятые градации опасности:

1. **Опасная** – расстояние от предполагаемых или подтвержденных штреков каменоломен составляет до 50 м.
2. **Потенциально опасная** - расстояние от предполагаемых или подтвержденных штреков каменоломен составляет от 50 до 100 м
3. **Неопасная** - расстояние от предполагаемых или подтвержденных штреков каменоломен составляет более 100 м

Итоговая карта районирования территории по опасности, *образования провалов, образованных из-за перемещения грунта в полости каменоломен* (рисунок 11), представляет собой совмещение двух карт районирования для СпБ реализованной и нереализованной опасности, где каждому участку присваивается наивысшая категория опасности.

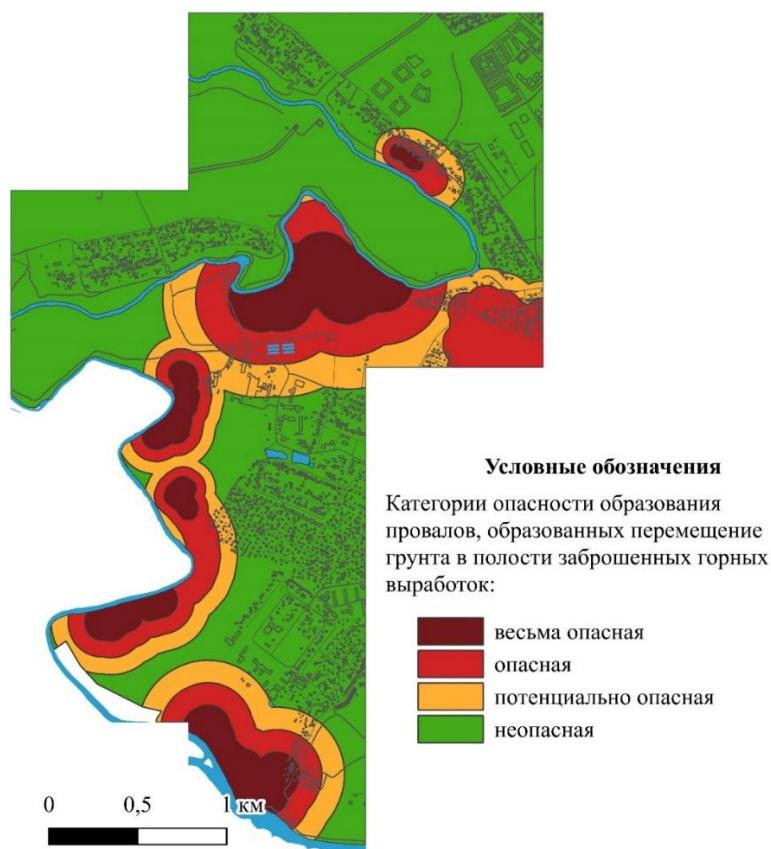


Рисунок 11. Районирование территории по опасности возникновения провалов, образованных перемещением грунта в полости каменоломен

Районирование территории по опасности провалообразования

Итоговая карта районирования территории по категориям опасности провалообразования представляет собой результат совмещения карт районирования по карстовой опасности (рисунок 10) и районирования территории по опасности образования провалов, образованных перемещением грунта в полости каменоломен (рисунок 11). Категория опасности для каждого участка присваивается в соответствии с наиболее опасной из категорий, показанных на двух упомянутых картах (рисунок 12). В табличной форме методику районирования можно представить так (таблица 3):

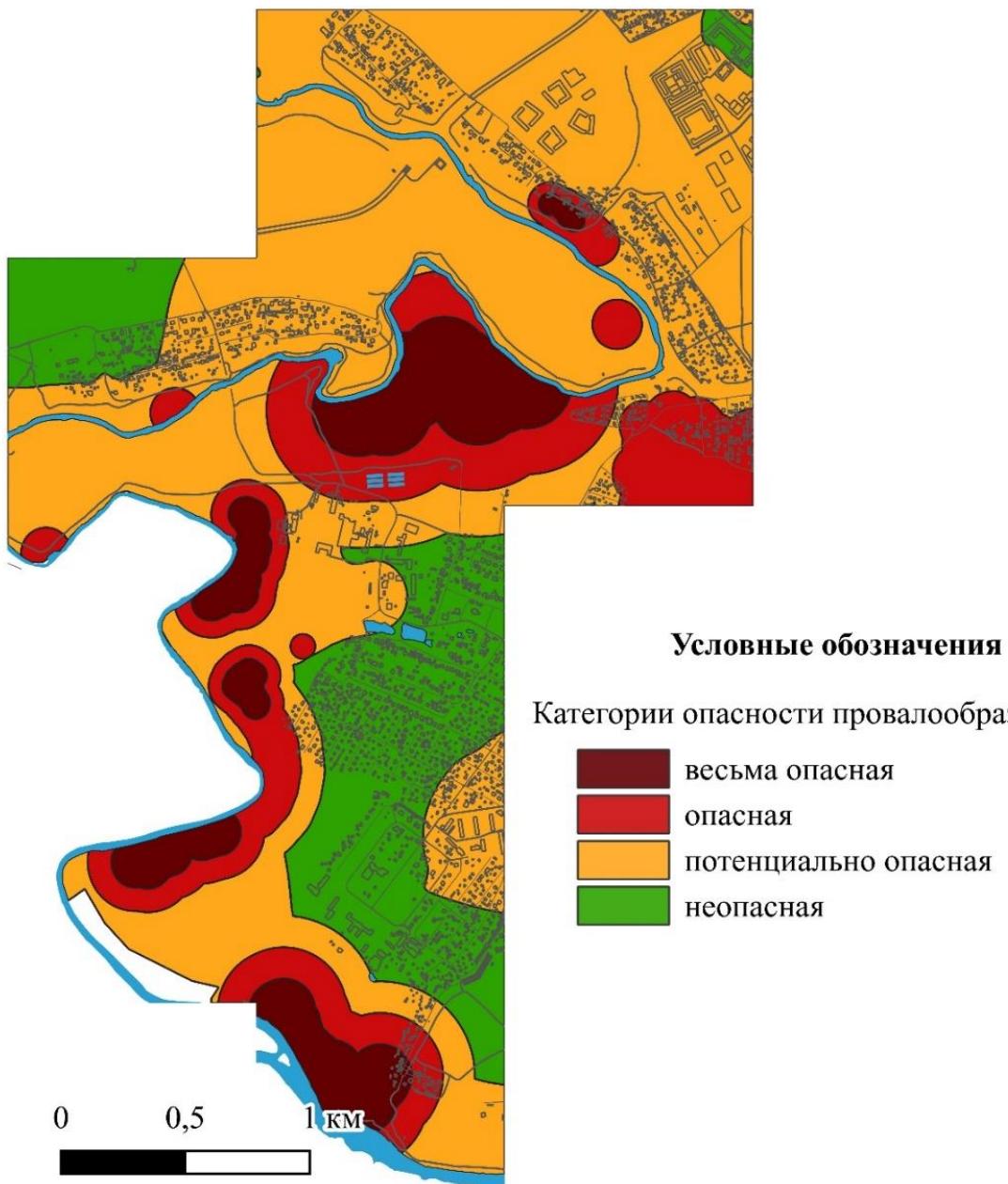


Рисунок 12. Карта районирования территории по опасности провалообразования.

Таблица 3. Районирование территории по опасности провалообразования

		Категории опасности возникновения провалов, образованных перемещением грунта в полости каменоломен			
		весьма опасная	опасная	потенциально опасная	неопасная
Категории карстовой опасности	опасная	весьма опасная	опасная	опасная	опасная
	потенциально опасная	весьма опасная	опасная	потенциально опасная	потенциально опасная
	неопасная	весьма опасная	опасная	потенциально опасная	неопасная

Площадь территории весьма опасной категории составляет $0,70 \text{ км}^2$ (8,74% площади территории), опасной $1,21 \text{ км}^2$ (15,11 % площади территории), потенциально опасной $1,47 \text{ км}^2$ (18,48 % площади территории), неопасной $4,63 \text{ км}^2$ (57,67 % площади территории).

Выводы к главе 6

В главе 6 предложена методика районирования территории ТиНАО по степени опасности провалообразования с учетом опасности перемещения грунта в полости каменоломен. В результате можно сделать следующие выводы:

1. Районирование территории по опасности провалообразования должно учитывать, как образование провалов карстового происхождения, так и опасность, вызванную перемещением грунта в полости каменоломен. Категорий опасности следует выделять 4: «неопасная», «потенциально опасная», «опасная» и «весьма опасная». «Весьма опасная» категория присваивается участкам с выявленными деформациями земной поверхности, приуроченными к наличию каменоломен;
2. Предложенная методика районирования, основанная на комплексном применении методов ДЗЗ, камеральных работ и полевых исследований, позволяет проводить районирование территории по степени опасности провалообразования. Данную методику можно использовать для территории всего ТиНАО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория ТиНАО является частью г. Москвы. В связи с перспективой освоения, выявление проявлений опасных экзогенных геологических процессов и районирование территории по степени опасности является актуальной задачей. Данная территория заселена людьми давно, из-за чего природный рельеф очень сильно изменен, что затрудняет генетическую идентификацию небольших понижений рельефа. На исследуемом участке, площадью $8,01 \text{ км}^2$ выявлено 155 бессточных впадин, образованных перемещением грунта

в полости каменоломен и 6 понижений, скорее всего, карстового (или суффозионного) происхождения.

Проведенные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. разработанный алгоритм автоматизированной оцифровки локальных понижений рельефа с отбраковкой артефактов на основе плотности данных лазарной съемки позволяет с использованием минимального ручного труда получить информацию о локальных понижениях рельефа.
2. Поверхностные понижения, образованные в результате перемещения грунта в полости заброшенных подземных горных выработок, на исследуемом участке достигают в диаметре более 10 м, и имеют глубину более 1,5 м, а в самих полостях каменоломен встречаются обвалы и конусы выноса связных и несвязных грунтов. Для учета опасности обрушения кровли штреков каменоломен необходима вся возможная информация о местоположении их штреков и поверхностных понижений рельефа в местах подземной добычи камня.
3. Разработана методика оценки районирования территории по опасности провалообразования, учитывающая мощность глинистых отложений, залегающих над первым от поверхности слоем закарстованных отложений, удаленность от ближайшего карстового проявления, и опасность обрушения кровли штреков каменоломен.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»:

1. Жидков Р.Ю., Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Рекун В.С., Лесников Г.А. Применение данных дистанционного зондирования Земли для идентификации опасных геологических процессов на территории Новой Москвы // Инженерная геология. Том XVIII 4/2023. С.18-37.
2. Дробинина Е.В., Китаева М.А., Романова Е.Р. Особенности мониторинга опасных инженерно-геологических процессов с применением геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли // Вестник Пермского университета. Том 24, №1. С. 23-31
3. Романова Е.Р., Буфеев Ф.К. Районирование территории на северо-западе Москвы по степени карстово-суффозионной опасности // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2025. №2. С.3-18.
4. Романова Е.Р., Китаева М.А., Дробинина Е.В. К вопросу изучения опасных инженерно-геологических процессов с применением данных дистанционного зондирования земли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025 №8. С.74-94.