

На правах рукописи



ГАРАЕВА АНАСТАСИЯ НИКОЛАЕВНА

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ЭЛЮВИАЛЬНЫХ КАРБОНАТНЫХ ГРУНТОВ
БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО
БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ**

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Казань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт геологии и нефтегазовых технологий, кафедра общей геологии и гидрогеологии.

Научный руководитель:

Латыпов Айрат Исламгалиевич, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Строкова Людмила Александровна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов, профессор.

Гайнанов Шарибзан Хатинович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кафедра «Инженерная геология и охрана недр», доцент.

Ведущая организация:

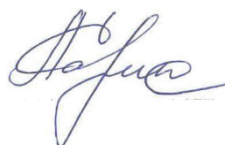
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ» г. Екатеринбург)

Защита состоится « 9 » февраля 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.03.22 по адресу 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>).

Автореферат диссертации разослан « 9 » января 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета Д ПНИПУ.03.22
кандидат геолого-минералогических наук



К.А. Алванян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Элювиальные грунты зоны гипергенеза обладают высокой степенью структурной неоднородности, склонностью к механической и химической суффозии, снижением прочности и увеличением сжимаемости при водонасыщении, что обуславливает их принадлежность к категории специфических грунтов, требующих дополнительных инженерно-геологических исследований.

Территория Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности расположена в юго-восточной части Республики Татарстан (РТ). В отличие от всей территории Бугульминско-Белебеевской возвышенности, где широко представлен как терригенный, так и карбонатно-терригенный и карбонатный элювий, на территории Бугульминского плато преимущественно распространены карбонатные элювиальные грунты, повсеместно выходящие на дневную поверхность и часто входящих в состав грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений.

Антропогенная нагрузка в этой части РТ является высокой: здесь расположено несколько крупных городов, разрабатываются крупнейшие месторождения нефти, функционируют ряд промышленных заводов и объектов химической, нефтяной и сельскохозяйственной промышленности. При этом инженерно-геологическая изученность исследуемой территории значительно уступает восточной и центральной частям РТ: до настоящего времени малоизвестно об особенностях распространения элювиальных отложений в карбонатных массивах, слабо изучено их строение, состав, степень изменчивости показателей физико-механических свойств по разрезу. Дополнительную сложность создает то, что техногенное освоение территорий способствует значительной активизации природных и техноприродных процессов, таких как суффозия и карст.

Степень изученности проблемы. Теоретические разработки и методы исследования горных пород, в том числе элювиального происхождения бурно начали развиваться в 50-80-х годах. Благодаря фундаментальным исследованиям Е.М. Сергеева (1952 г., 1986 г.), Б.Б. Польшова (1934 г.), В.Т. Трофимова (1977 г.), Г.А. Голодковской (1968 г.), И.И. Гинзбурга (1946 г., 1947 г.), Л.А. Яр (1974 г., 1991 г.) К.И. Лукашова (1956, 1958 г.) и мн. др. выяснено, что строение и состав грунтовых толщ, также, как и распределение показателей состава и свойств грунтов, связаны, прежде всего, с особенностями геологического строения территории. Выделением геологических типов кор выветривания с учетом тектонических факторов занимались В.Н. Разумова (1936 г.), Н.П. Херасков, А.Г. Черняховский (1966 г.). Схемы расчленения кор выветривания на зоны в инженерной геологии предложены: Г.С. Золотаревым (1948, 1963 гг.), В.Б. Швецом (1970 г.), Л.А. Яр (1991 г.), Б.Б. Польшовым (1934 г.), М. Варгас (1953 г.) Н.В. Коломенским (1949 г.), Э.А. Джавахишвили (1962, 1970 г.), В.Д. Ломтадзе (1970 г.), И.И. Гинзбургом (1947 г.), А.В. Вторушиным (1966 г.) и др. Благодаря исследованиям, выяснено, что границы зон выветривания весьма условны и устанавливаются при видимой смене одних выветрелых пород другими или на основании минерального состава этих пород.

Изучение физико-механических свойств пород при выветривании нашли отражение в работах: Ф.П. Саваренского (1937 г.), Э.Р. Черняка (2011 г.), Н.В. Коломенского (1952 г.), Г.С. Золотарева (1971 г.), В.Д. Ломтадзе (1970 г.), Н.Н. Маслова (1982 г.), В.Б. Швеца (1993 г.), Ю.Д. Матвеева (1968 г.), Л.А. Яр (1974 г.), Е.Г. Чаповского (1975 г.), Е.В. Сергеева (1986 г.), В.П. Маричева (1976 г.), Г.К. Бондарика (1971 г.), А.Г. Барановского (2015 г.), В.Б. Швеца (1993 г.), В.Н. Широкова (1989 г.), Н.А. Цилюрика (1961 г.), Г.К. Бондарика (1971 г.), М.В. Раца (1968 г.), И.С. Комарова (1982 г.) и др., которые с помощью методов математической статистики раскрыли основные закономерности изменчивости свойств и состава грунтов.

Современные исследования кор выветривания посвящены, как правило, либо изучению небольших по площади объектов, например работы А.Г. Барановского (2018 г.), Р.К. Илаловой (2018

г.), Н.М. Конне Амбеньян (2012 г.), либо решению некоторой прикладной задачи: А.А. Сафроновой (1990 г.), Р.М. Каримова (2007 г.), Р.С. Смирнова, В.О. Городниченко, Е.Н. Сычкина (2015 г.), А.Н. Галкина (2016 г.), Д.М. Шестернева (2017 г.), С.А. Александрова, О.М. Гуман (2019 г.), И.В. Абатуровой, Т.С. Бобина, Л.А. Стороженко (2022 г.) и др.

В описании геологического строения грунтовых массивов на территории Республики Татарстан элювиальные грунты охарактеризованы весьма поверхностно, как правило, в общем описании геологических условий без детализации инженерно-геологических характеристик данных грунтов. Основные исследования на территории Республики Татарстан связаны с работами А.Н. Мазаровича (1935 г.), Е.И. Тихвинской (1939 г.), А.П. Дедкова, (1968 г.), Е.В. Милановской (1935 г.), Г.Ф. Мирчинка (1932 г.), Н.И. Николаева (1935 г.), Е.Н. Пермякова (1935 г.), М.С. Кавеева, Ф.С. Хабибуллиной (1965 г.), В.А. Полянина (1957 г.), О.Н. Малышевой, А.П. Дедкова (1970 г.), Г.П. Бутакова (2003 г.), А.В. Кожевникова (1959 г.) и др.

Исследованиями элювиальных грунтов за рубежом начали заниматься с 1950-х годов. Большинство исследований направлено на поиск закономерностей характеристик выветривания в различных зонах и районах Derakhshan-Babaei, Nosrati, Tihomirov, Chistl, Sadough & Egli (2020 г.), Meyer, Kuhwald, Petersen & Duttman (2021 г.), A.L. Little, (1969 г.), P.G. Fookes et al., (1977 г.), W.R. Dearman и др., (1978 г.). Другая часть изучает влияние процессов выветривания на развитие неблагоприятных факторов для проектирования и строительства, Xiaolidong, Cohen, Martin, McLaughlin, BradMurray, Ward, Flint & Heffernan, (2019 г.).

Главная научная идея диссертационной работы заключается в установлении особенностей распространения покровных элювиальных отложений, изучении строения их профиля выветривания, а также связанных с ними экзогенных процессов.

Цель работы: комплексное изучение строения, физико-механических свойств, минерального состава элювиальных отложений, особенностей их распространения в пределах Бугульминского плато, а также их влияние на суффозионные процессы с оценкой суффозионной опасности территории.

Задачи исследования:

- выполнить анализ и систематизацию существующих представлений об элювиальных грунтах, истории их изучения, основных закономерностей распространения, физико-механических свойств грунтов различных зон коры выветривания;
- выявить особенности распространения карбонатных элювиальных грунтов с выделением структурных горизонтов молодых кор выветривания в границах исследуемой территории;
- изучить изменчивость минералогического состава и физико-механических свойств элювиальных карбонатных грунтов по профилю выветривания;
- провести количественную и качественную оценку суффозионной опасности в зависимости от особенностей сложения и степени неоднородности грансостава профиля выветривания с использованием расчетного метода и лабораторного физического моделирования;
- провести пространственный анализ распространения карбонатного элювия с использованием ГИС технологий и последующим построением карт.

В качестве **объекта исследований** были выбраны карбонатные элювиальные грунты зоны гипергенеза на территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности в юго-восточной части Республики Татарстан.

Методология и методы исследования. Основные положения и выводы диссертационной работы основаны на материалах теоретических исследований, полевого рекогносцировочного обследования и лабораторных исследованиях карбонатных элювиальных грунтов, выполняемых автором на протяжении нескольких лет. В ходе рекогносцировочного маршрутного обследования был изучен 201 карбонатный карьер на территории Бугульминского плато, отобрано в общей

сложности 1280 образцов на различные виды исследований. Лабораторные исследования физико-механических свойств элювиальных грунтов проведены согласно СП 47.13330.2016, СП 22.13330.2016 с соблюдением ГОСТ 25100-2020, ГОСТ 5180-2015, 30416-2020, 12248-2020, 12536-2014, рекомендаций по оценке инженерно-геологических свойств элювия карбонатных грунтов и учету их изменения при строительстве (ПНИИС г. Москва, 1986 г). Деформационные и прочностные свойства грунтов определялись в приборах одноосного сжатия АСИС НПП «Геотек» (г. Пенза). Фильтрационно-суффозионные испытания были выполнены на установке собственной разработки (патент № 2022110200 от 15.04.2022 МПК-2022.01 G01N 3/10 «Устройство для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования»). Минеральный состав элювиальных образований определялся методом рентгенографических исследований на дифрактометре D2 Phaser (Брукер, Германия). Микроструктурные характеристики элювиальных грунтов изучались на электронном микроскопе FEI XL-30ESEM. Картографические модели были построены в программном продукте «ArcGIS 10.8 (ESRI, США)».

Научная новизна исследований: впервые проведена комплексная литологическая и инженерно-геологическая оценка элювиальных карбонатных грунтов с выделением структурных горизонтов молодых кор выветривания на территории Бугульминского плато юго-восточной части РТ; выявлено влияние минерального состава и строения горизонтов профиля выветривания на физико-механические свойства карбонатного элювия; установлена взаимосвязь развития суффозионных процессов в дифференцированных профилях молодых кор выветривания с трещиноватостью структурного элювия и неоднородностью гранулометрического состава бесструктурного элювия; впервые построены карты распространения карбонатного элювия в пределах Бугульминского плато с обозначением его мощности, неоднородности грунта бесструктурного элювия с распространением суффозионных и карстово-суффозионных воронок; степени трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

а) в существенном расширении представлений о распространении элювиальных карбонатных грунтов на территории Бугульминского плато РТ;

б) выявлении закономерностей изменчивости физико-механических свойств и минерального состава элювиальных карбонатных грунтов, что может быть использовано при проектировании инженерных объектов;

в) в создании информативной серии карт, которые могут быть использованы при проектировании и планировании инженерных изысканий.

Положения, выносимые на защиту:

1. В строении профиля молодых кор выветривания Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности выделены несколько структурных зон, различающихся различной степенью преобразованности материнских карбонатных пород: зона бесструктурного элювия, зона структурного элювия и сохранный массив. Полнота профиля кор выветривания определяется региональными климатическими и геологическими факторами.

2. Каждой структурной зоне профиля карбонатной коры выветривания присущи определенные физико-механические свойства, определяющиеся минеральным составом и структурно-текстурными особенностями материнских пород.

3. Суффозионные процессы в дифференцированных профилях молодых кор выветривания развиваются при сочетании следующих первопричинных факторов: особенностей сложения, неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов обеспечиваются применением современных методов лабораторных испытаний, значительным объемом анализируемого фактического материала в сочетании с современными методами его математической обработки с выявлением статистической сходимости по каждому виду исследований, обработкой картографического материала, выполненной автором верификации своих прогнозных построений прямыми наземными наблюдениями, а также внутренней непротиворечивостью сделанных выводов и их согласованностью с современными представлениями инженерной геологии.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях в городах: Пермь (2022 г.), Саратов (2021 г.), Москва (2022, 2022, 2021 г.), Барнаул (2021 г.), Уфа (2021, 2022 г.), Томск (2022 г.). Публикаций по теме диссертации – 10, из них 2 в журналах из перечня ВАК, 2 работы в издании, индексируемом в базе Scopus.

Личный вклад автора в работу. Автор принимал личное участие в сборе, обработке и анализе данных о строении, составе, строении и физико-механических свойствах элювиальных грунтов на территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Провел комплексное изучение минерального состава, строения и физико-механических свойств элювиальных грунтов с последующим выделением структурных горизонтов и зон молодых кор выветривания. На основании полученных данных построил карты распространения карбонатного элювия с выделением их мощности, трещиноватости и степени неоднородности грунтового массива, распространения карстово-суффозионных воронок на изучаемой территории и интегральную карту суффозионной опасности территории. Совместно с научным руководителем сконструировал устройство и провел исследования в области моделирования развития суффозионных процессов в дифференцированных профилях молодых кор выветривания. Провел обобщение представленных в диссертации инженерно-геологических материалов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов и списка литературы. Работа содержит 44 рисунка, 12 таблиц. Общий объем работы составляет 125 страниц, список литературы состоит из 165 наименований

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю кандидату технических наук, доценту А.И. Латыпову за предоставленное научное направление, за содействие в сборе материалов, ценные советы на каждом этапе исследования. Диссертант благодарен коллективу своей кафедры за полученные знания, навыки, поддержку и отзывчивость. Автор признателен за консультации и помощь доценту к.г.-м.н. Королеву Э.А., профессору, д.ф.-м.н. Храмченкову М.Г, доценту к.ф.-м.н. Галееву А.А., доценту к.г.-м.н. Ескину А.А., инженерам Г.М. Ескиной, О.В. Луневой, Б.М. Галиуллину, Н.Н. Равиловой, О.Ю. Адрушкевичу. Диссертант выражает благодарность своей семье за помощь и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, приведена информация о фактическом материале, личном вкладе автора, а также о научной новизне, теоретической и практической значимости работы.

В первой главе диссертации отражено современное состояние вопроса исследований элювиальных грунтов, история изучения кор выветривания, неоднородности их строения, состава и физико-механических свойств элювиальных грунтов, как в России, так и за границей.

Во второй главе диссертации приведена общая инженерно-геологическая характеристика территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, расположенное в юго-восточной части Республики Татарстан (РТ).

В третьей главе диссертации отражены особенности строения, распространения и условия формирования кор выветривания с выделением факторов формирования, распространения элювиальных грунтов и строения профиля молодых кор выветривания.

Бугульминское плато на территории Татарстана представляет собой одну из вершин Бугульминско-Белебеевской возвышенности, осложняющих поверхность Южно-Татарского свода (ЮТС). Границу Бугульминского плато можно провести по гипсометрическим отметкам 260-382 м, между которыми располагаются удлиненные гряды понижений. Начиная с неогена территория испытывала поднятия, в результате чего на поверхности обнажились карбонатно-терригенные отложения казанского и уржумского яруса. Различная интенсивность воздыманий блоков кристаллического фундамента в основании ЮТС обусловила формирование полого-холмистого рельефа с останцами выравненных вершин террасированных по склонам водоразделов, отделенных друг от друга небольшими речными долинами. Выположенные вершины водоразделов на протяжении этапа похолоданий в период развития валдайского оледенения подвергались морозному выветриванию, которое сформировало относительно мощную зону дезинтеграции в верхней части разреза рассматриваемой территории. В это же время достаточно интенсивно проявлялись процессы перемещения пород в результате водно-денудационных процессов. В этапы кратковременных потеплений физическое выветривание ослаблялось, активизировались процессы химического выветривания. Дезинтегрированные карбонатные породы частично растворялись, растворенное минеральное вещества вновь откладывалось в виде кальцитовых натечных корочек на стенках трещин в нижней части профиля зоны гипергенеза. Неоднократные смены холодного и умеренного влажного климата и чередующиеся ландшафты способствовали развитию здесь процессов континентального литогенеза гумидного типа по Страхову Н.М. (1960 г.). В большинстве своем материнскими породами, по которым развивался элювиальный покров, являлись микрозернистые доломиты и известняки казанского и уржумского яруса располагающиеся на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев мощностью 5–10 м.

Геологические исследования Разумова В.Н., Херасков Н.П., Черняховский А.Г. (1963 г.) о составе и строении покровного элювия позволило установить в разрезе их профиля определенную зональность, характерную для молодых кор выветривания. Наиболее полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами представлен на рисунке 1 и описан ниже.

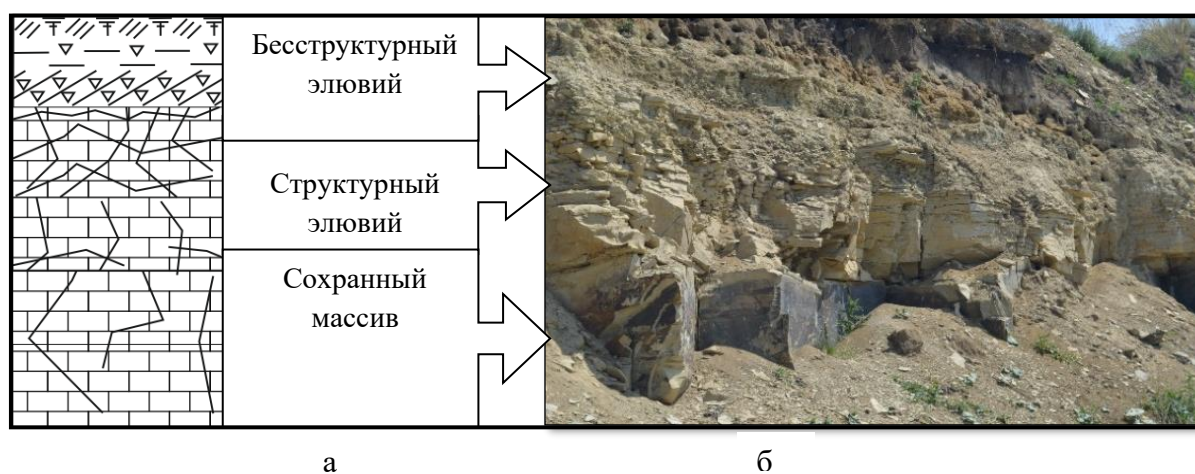


Рис. 1. Схема залегания (а) карбонатных пород и фото (б) карьера п. Райлан Бугульминский район Республики Татарстан

В основании зоны гипергенного преобразования пород залегают плотные, светло-серые, массивные карбонатные породы. В стенках карьеров видно, что породы секутся редкими вертикальными трещинами разгрузки, находящимися на расстоянии 10–15 м друг от друга. Над ними залегают карбонатные породы, разбитые более многочисленными системами вертикальных и горизонтальных трещин на блочные отдельности.

Снизу вверх размеры блоков в пределах слоя уменьшаются. Если в подошве слой сложен крупноблочными отдельностями (1,5x0,6x0,8 м), то в верхней части – уже мелкоблочными (0,5x0,25x0,3 м). Трещины, секущие породу, имеют раскрытость до 1,5 см; в кровле слоя присутствуют следы вторичной кальцитизации в виде бурых корочек натечного кальцита. Мощность слоя с повышенной трещиноватостью составляет около 4,0 м. Слой представляет собой сохранный массив.

Над ним согласно залегает слой плитчатых карбонатных пород. Породы светло-серые, слабо глинистые, характеризуются микрозернистой структурой, разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на плитчатые отдельности. В подошве слоя преобладает крупно-плитчатая отдельность, в кровле – тонкоплитчатая. Слой представляет собой структурный элювий, все плитчатые отдельности находятся в положение, которое соответствуют залеганию первичной карбонатной породе.

Выше по разрезу залегает слой бесструктурного элювия. Он представлен светло-серой карбонатной и карбонатно-глинистой мукой, в которой присутствуют различные по размерам обломки карбонатных пород. От подошвы к кровле слоя размер обломков карбонатных пород последовательно снижается, уменьшается содержание псефитовой фракции, увеличивается доля псаммитовой и алевритовой фракций. Слой несет следы струйчатых суффозионных выносов тонкодисперсного материала и вмываний в образованные полости и понижения красно-бурого глинистого материала. Мощность слоя карбонатной и карбонатно-глинистой муки бесструктурного элювия составляет 1,5–2,5 м. Над ним может залегать слой плитчатых карбонатных пород бесструктурного элювия, при этом плиточки отдельностей в слое легко разбираются на отдельные составляющие. Трещины раскрытостью 0,5–1,0 см частично заполнены карбонатно-глинистой мукой. Участками в верхней части слоя плитчатые отдельности несут следы деформаций в виде волнообразных изгибаний. Их образование обусловлено локальными размывами нижележащих пород с последующим формированием в кровле экзогенной складчатости. Мощность слоя плитчатых карбонатных пород составляет 2,0–2,5 м. Венчают карбонатный разрез эрозионно-денудационных вершин красно-бурые суглинки, переходящие темно-серые подзолистые почвы. Толщина терригенных покровных отложений составляет 0,4–0,6 м.

В ходе рекогносцировочного маршрутного обследования был изучен 201 карбонатный карьер на территории Бугульминского плато (рис.2), расположение которых показано на карте пространственного распространения мощности элювиальных грунтов. Карта построена по результатам моделирования в программной среде ArcMap 10.8 (рис.3). На территории можно выделить 3 наиболее распространённых карбонатных профиля, сформированных в разной геолого-геоморфологической обстановке, описание профилей представлено ниже.

Наиболее мощный и полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами развит в пределах выположенных вершин эрозионно-денудационных водоразделов и эрозионно-денудационных поверхностях приводораздельных частей склонов междуречья рек Шешма и р. Степной Зай; р. Степной Зай и р. Мелля; р. Степной Зай, р. Ик и р. Дымка; р. Дымка, р. Ик и р. Киндыз. Профиль сложен в различной степени преобразованными известняками, доломитами, глинами и карбонатной мукой казанского и уржумского ярусов. Его особенностью является повышенная мощность зоны структурного элювия и пониженная мощность зоны бесструктурного элювия. Общая мощность элювиальных отложений составляет от 4,0 до 6,0 м.

В пределах средней части склонов эрозионно-денудационных останцев развиты коры выветривания сокращенной мощности. Данный профиль сложен породами казанского яруса: известняками, доломитами, мергелем, карбонатной мукой, песчаниками. Профиль характеризуется повышенной мощностью слоя бесструктурного элювия и более пониженной мощностью слоя структурного элювия. Общая мощность элювиального покрова составляет от 1,5 до 4,1.

В пределах речных долин эрозионно-аккумулятивных поверхностях нижней части склонов развиты наиболее маломощные покровные элювиальные отложения. Их профиль практически не развит, генетические горизонты плохо обособлены, горизонт структурного элювия практически отсутствует, бесструктурные отложения имеют мощность до 1,5 м. Его формирование связано с периодическими смещениями русла речных долин, способствующих размыву ранее накопленных элювиальных толщ.

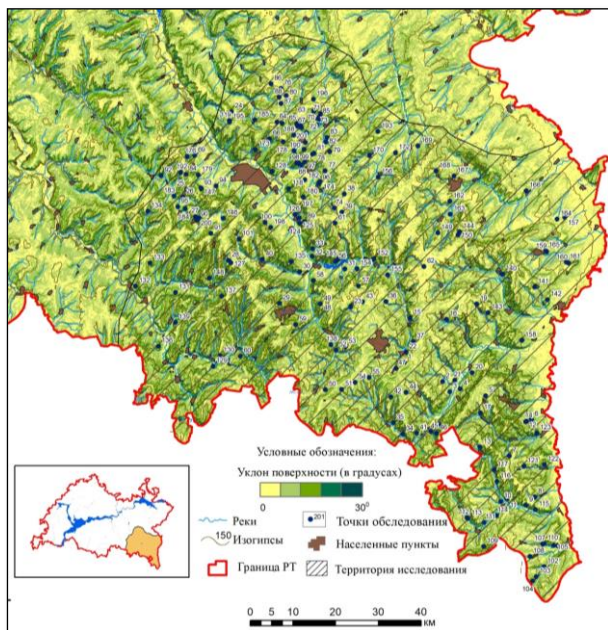


Рис.2. Карта фактического материала

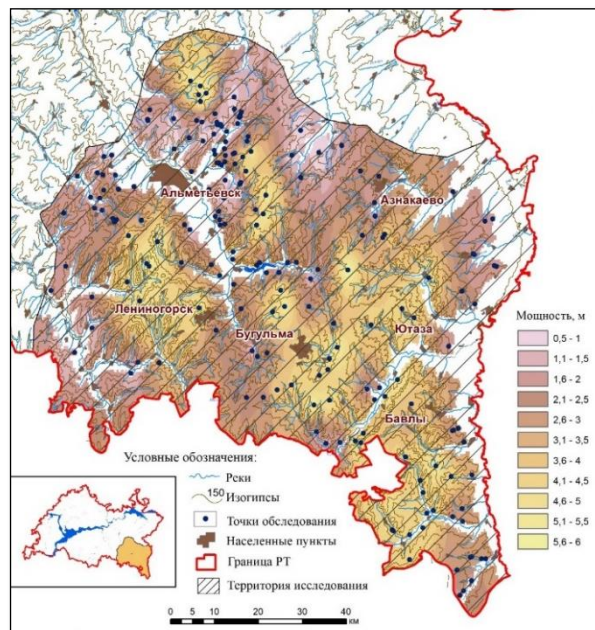


Рис.3. Карта пространственного распространения мощности элювиальных грунтов

Как следует из описания профиля гипергенеза и анализа карты, на выположенных водоразделах Бугульминского плато широко развиты карбонатные молодые коры выветривания. В их строение хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных карбонатных пород. Гипергенные изменения обусловлены главным образом процессами физического выветривания с систематическими циклами промерзания-оттаивания.

Механизм дезинтеграции доломитов, известняков проявился в морфологии поверхностей псефитовых и алевритовых обломков карбонатных пород. Исследования с применением электронного микроскопа (30 образцов) показали, что периферия обломков сложена зернами доломитов с хорошо проявленными габитусными элементами в виде граней, ребер и углов ромбоэдров (рис.4б). Это возможно только в том случае, когда происходит механический разрыв связей между отдельными минеральными зёрнами в породе без их растворения. Для подтверждения этого предположения были проведены модельные эксперименты на 100 образцах карбонатных пород. Из исходных пород выпиливались образцы кубической формы 2,5x2,5x2,5 см. Образцы подвергались циклическим промораживаниям и оттаиваниям согласно методике ГОСТ Р 70259-2022. Через каждые 10 циклов осуществлялся визуальный осмотр образцов с определением их механических характеристик. Было установлено, что через 10 циклов промерзания-оттаивания образцы микрoзернистого доломита начали разваливаться на мелкие части с образованием на

поверхности доломитовых зерен и трещиноватости. Карбонатные породы, представленные известняками процесс физической дезинтеграции, проходил медленнее, только после 30 циклов замораживания и оттаивания, ухудшились физико-механические свойства пород на 10%.

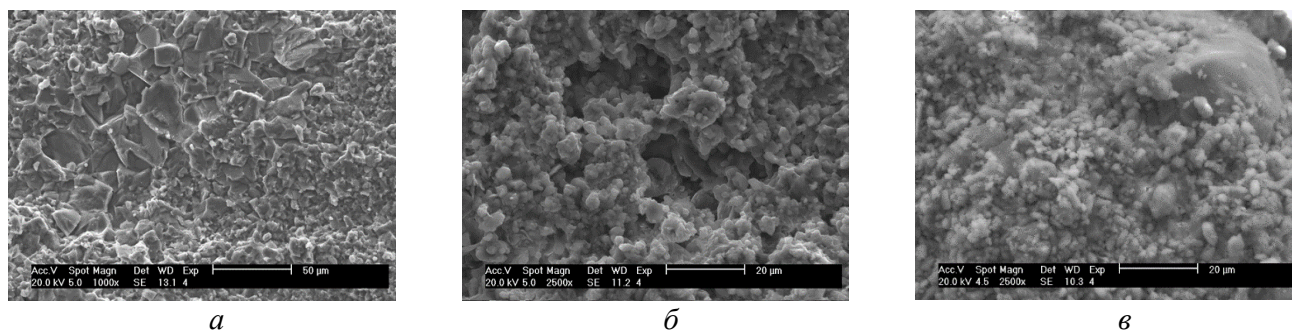


Рис. 4. Микростроение элювиальных карбонатных грунтов: горизонт сохранного массива (а), глубина отбора образца 4,0 м; горизонт структурного элювия (б), глубина отбора образца 2,2 м; горизонт бесструктурного элювия (в), глубина отбора образца 0,5 м.

Как видно, выветривание карбонатных пород сводится к физической дезинтеграции. Основным фактором выветривания являются сезонно-климатические перепады температур.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению минерального состава и физико-механических свойств карбонатных элювиальных грунтов.

В строении молодых кор выветривания хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных карбонатных пород. В соответствии с классификацией грунтовых массивов согласно ГОСТ 25100-2020 горизонты можно распределить на зоны выветрелых пород по степени экзогенного изменения (рис. 5):



Рис.5. Схема залегания (а) карбонатных пород и фото (б) карьера п. Райлан Бугульминский район Республики Татарстан

I. БЕССТРУКТУРНЫЙ ЭЛЮВИАЛЬНЫЙ ГОРИЗОНТ: ЗОНА А (зона сильного изменения) в подавляющем большинстве случаев представлена карбонатно-глинистой мукой характеризующейся рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. На исследуемой территории коэффициент неоднородности достигает значения $C_u=30$. Включения карбонатных пород (дресва и щебень) имеют сильную степень выветрелости, растираются руками и размягчаются в воде. В инженерно-геологическом отношении исследуемые грунты можно классифицировать как карбонатные суглинки с включениями дресвы карбонатных пород, в редких случаях как дресвяно-щебнистый грунт с пылеватым и песчаным заполнителем. Практически все частицы крупнее 0,005 мм, преобладающая фракция – 0,1–0,01 мм. Содержание дресвы и щебня в карбонатных суглинках составляет 5–49 %, в дресвяно-щебнистых грунтах – от 50 до 70%. Пластичность карбонатной муки обеспечивается наличием частиц мельче 0,01 мм или, в некоторых

случаях, присутствием глинистой компоненты. Плотность грунта находится в пределах 1,76–2,0 г/см³. Пористость 31,68–50,5%. Модуль деформации находится в пределах 15–35,5 МПа. Числа пластичности находятся в пределах 8–17. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

ЗОНА Б (зона средней степени изменения) сложена разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. В отдельных участках горизонта плиточки налегают друг на друга, в других - наклонены под углом 5-20°, в-третьих - волнообразно изгибаются, образуя небольшие по амплитуде экзогенные складочки.

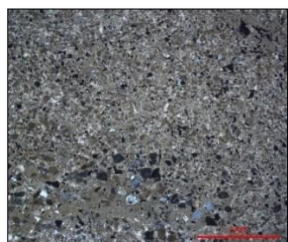
Согласно Приложениям Б ГОСТ 25100–2020 по прочности породы классифицируются как малопрочные грунты (предел прочности на одноосное сжатие $R_c=8,2-14,2$ МПа), по плотности скелета – как средней плотности и плотные грунты. Обломки сильновыветрелые (коэффициент выветрелости $K_{wr}<0,80$ и размягчаемые водой (коэффициент размягчаемости $K_{sof}<0,75$). Средняя плотность - 2,2–2,5 г/см³, пористость 11,6-13,5 %. Мощность зоны составляет от 0,3 до 0,6 м.

II. СТРУКТУРНЫЙ ЭЛЮВИАЛЬНЫЙ ГОРИЗОНТ: ЗОНА В (зона слабого изменения). Зона сложена плотными, слабо трещиноватыми известняками, доломитами. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей с блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и средне-плитчатой. Средняя плотность - 2,5–2,7 г/см³, пористость 6,2–10,5 %. Предел прочности на одноосное сжатие $R_c=12,4-60,5$ МПа. Коэффициент выветрелости $0,8 < K_{wr} < 0,9$ (породы выветрелые). Мощность слоя варьирует от 0,5 до 2,8 м.

III. СОХРАННЫЙ МАССИВ: ЗОНА Г представляет собой плотные породы, светло-серой окраски, с микро-тонкозернистой структурой, массивной или неясно-слоистой текстурой за счет наличия глинистых слоев. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности. Протяженные трещинные фильтрационные каналы раскрытостью до 2,0 см. Средняя плотность - 2,6–2,9 г/см³, пористость 3,1–5,5 %. Предел прочности на одноосное сжатие $R_c=67,4-118,5$ МПа. Коэффициент выветрелости $K_{wr}>0,9$ (породы слабовыветрелые).

На физические и механические свойства элювиальных карбонатных грунтов большое влияние оказывает состав и структура исходных карбонатных пород, определяющих сопротивляемость материнской породы к выветриванию.

По результатам литолого-минералогических исследований элювиальные отложения были подразделены на две разновидности современных элювиальных кор выветривания, представленных на рисунке 6. В основе подразделения положен минеральный состав коренных пород, по которым развивается зона структурного элювия.



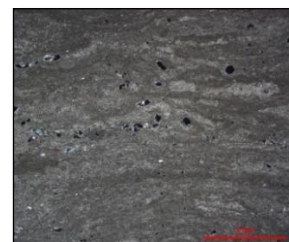
Пеллоидно-комковатый известняк



Известняк алевропесчанистый



Доломит микрозернистый



Доломит строматолитовый

Рис.6. Микроскопическая структура основных карбонатных пород

Первая разновидность (Зона В/Б – I) представлена тонкослоистыми или массивными известняками. Независимо от текстурных признаков они все характеризуются светло-серой

окраской, с буроватым оттенком за счет ожелезнения, неравномерно-зернистой структурой, линзовидно-слоистой или скрытозернистой текстурой плотным сложением. Их пористость, как правило, незначительна (5–15%). Поры выщелачивания, межформенные, сообщающиеся, образуют извилистые каналы диаметром 0,05–0,1 мм. В результате выщелачивания обломки минералов и горных пород выносятся из породы, образуя щелевидные полости. При этом пористость известняков увеличивается до 15–20%. Каверны выщелачивания частично залечены аутигенным яснозернистым кальцитом. Средняя плотность - 2,4–2,7 г/см³, пористость 10,5–14,5 %. Водопоглощение 1,9–2,1 %. Предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 8,2–70,5$ МПа.

Вторая разновидность (Зона В/Б – II) карбонатных пород представлена тонкослоистыми или массивными доломитами. Характеризуются светло-серой, светло-коричневой окраской, плотным сложением, с волнисто-слоистой текстурой. В межзерновом пространстве доломитов присутствуют темно-бурые включения глинистого материала, равномерно распределенные в породе. Породы содержат 2–6% пор. Поры преимущественно изометричные размером 0,05–0,1 мм. По границам волнистых слоев фиксируются щелевидные, протяженные поровые каналы. Средняя плотность – 2,2–2,5 г/см³, пористость 8,2–11,2%. Водопоглощение 0,34–1,8 %, предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 6,5–55,4$ МПа.

Согласно ГОСТ 25100–2020 грунты обоих типов по прочности классифицируются как грунты средней прочности и прочные; по плотности скелета – как средней плотности и плотные.

Продуктами физической дезинтеграции основных разновидностей карбонатных пород является карбонатная мука различного минерального состава и физико-механическим свойствам. Минеральный состав бесструктурного карбонатного элювия, в силу незавершенности процесса выветривания, характеризуется широким диапазоном процентного содержания минералов (таблица 1). На основании инженерно-геологической классификации с учетом минерального состава и физико-механических свойств на территории Бугульминского плато выделяются 2 основные разновидности карбонатно-глинистой муки:

Таблица 1 – Минералогический состав бесструктурного карбонатного элювия

Литология карбонатных пород	Минералогический состав (вес, %)						
	Доломит	Кальцит	Альбит	Кварц	Монт-морило-нит	Микроклин	Каолин
Зона А – I Карбонатно-глинистая мука известковая (20 образцов)	$\frac{1}{2} \div \frac{4}{2}$	$\frac{35}{43} \div \frac{50}{43}$	$\frac{20}{25} \div \frac{30}{25}$	$\frac{10}{13} \div \frac{15}{13}$	$\frac{6}{8} \div \frac{10}{8}$	$\frac{2}{5} \div \frac{10}{5}$	$\frac{1}{3} \div \frac{5}{3}$
Зона А – II Карбонатно-глинистая мука доломитовая (20 образцов)	$\frac{30}{40} \div \frac{50}{40}$	$\frac{5}{7} \div \frac{10}{7}$	$\frac{10}{17} \div \frac{25}{17}$	$\frac{10}{17} \div \frac{25}{17}$	$\frac{1}{5} \div \frac{10}{5}$	$\frac{1}{3} \div \frac{5}{3}$	$\frac{1}{3} \div \frac{5}{3}$

Зона А – I. Карбонатно-глинистая мука известковистая с включением дресвы и щебня карбонатных пород. Известковая мука обладает пластичными свойствами ($I_p = 8–12$), показатель текучести варьирует от 0,05 до 0,48. То есть, по своим реологическим параметрам они соответствуют легким суглинкам с полутвердой и тугопластичной консистенцией (ГОСТ 25100–2020). Отдельные пробы по числу пластичности были классифицированы как супеси пластичные (8% от всех исследований группы). Плотность грунта находится в пределах 1,87–2,05 г/см³. Пористость 31,68–43,25%. Модуль деформации находится в пределах 21–49 МПа, угол внутреннего трения – 20–27°, удельное сцепление – 10–33 кПа.

Зона А – II. Карбонатно-глинистая мука доломитовая с включением дресвы и щебня карбонатных пород. Доломитовая мука обладает пластичными свойствами ($I_p=12-17$). То есть, по своим реологическим параметрам они соответствуют тяжелым суглинкам от твердой до мягкопластичной консистенции. Отдельные пробы по числу пластичности классифицируются как легкие глины (13% всех исследований группы). Плотность грунта изменяется в пределах 1,66–2,0 г/см³. Пористость 34,7–50,5%. Модуль деформации находится в пределах 13–35 МПа, угол внутреннего трения - 17-24°, удельное сцепление – 24–48 кПа.

Таким образом, в выделенных горизонтах структурного и бесструктурного элювия хорошо различаются зоны экзогенного изменения известняков и доломитов с разными физико-механическими свойствами.

В пятой главе диссертации представлена подробная характеристика суффозионной опасности территории, включающая оценку суффозионности грунтов бесструктурного элювия, трещиноватости грунтовых массивов зоны структурного элювия, результаты экспериментальных исследований развития процесса суффозии и построение тематических карт.

Изученность карстово-суффозионных процессов на исследуемой территории довольно низкая. Серьезные исследования отражены в работах А.В. Нечаева (1893 г.), П.И. Кротова (1894 г.), А.В. Ступишина (1954 г.), Е.И. Тихвинской (1939 -1954 г.), М.С. Кавеева (1954 г.), Б.В. Васильева (1966 г.), Б.В. Селивановского и С.Г. Каштанова (1961 г), Н.Н. Нелидова и А.М. Губайдуллина (1961 г.), А.В. Ступишина (1947 - 1972 г.), Н.П. Торсуева (1976 – 1986 г.), Е.Д. Кожеватовой (1980 – 1985 г.), В.И. Мозжерина и А.Н. Шарифуллина (1988 г.), А.Г. Мусина (1966 г.), А.В. Елкина (2002 г.), А.В. Аникеева и С.А. Чумаченко (2011 г.). Несмотря на глубину исследований, большинство из них посвящены преимущественно оценке карстовой опасности, мало затрагивая суффозионные процессы. Вместе с тем наблюдения показывают, что в рельефе исследуемой территории преобладают именно суффозионные формы.

Полевое обследование показало, что исследуемая территория по интенсивности провалообразования относится преимущественно к мало опасным, а в речных долинах и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай умеренно-опасным. За основу количественной оценки карстово-суффозионной опасности территорий нами была принята методика Рагозина А.Л (2003 г.). Общее количество зафиксированных суффозионных и карстово-суффозионных воронок составляет 1151 штука, средний минимальный диаметр воронок равен 6,5 м, средний максимальный диаметр 40 м.

В настоящей работе под суффозионным процессом (Хоменко В.П., 2003 г.) понимается разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов.

Процесс суффозии может представлять опасность лишь в том случае, если в массивах карбонатных пород происходит расширение отдельных трещин, дезинтеграция пород, растворение карстующих пород с образованием пустотности и есть условия для транспортировки фильтрационным потоком продуктов суффозии. При отсутствии вышеназванных условий грунтового массива развитие суффозионного процесса практически не происходит. Определяющим фактором развития суффозии, очевидно, является степень крупности частиц продукта выноса (неоднородность гранулометрического состава) и степень раскрытия трещин подстилающих карбонатных массивов. Учитывая это, в рамках исследования были проведены расчеты по определению параметров суффозионной устойчивости грунтов бесструктурного элювия, инструментальные замеры трещиноватости зоны структурного элювия и проведены модельные эксперименты по определению критических размеров полый трещины в экспериментальном лотке для всех выявленных разновидностей грунтов. Для оценки суффозионности элювиальных грунтов

бесструктурного элювия использовали методики П-56-90/ВНИИГ и П-49-90/ВНИИГ. При этом несuffозионность грунта считается обеспеченной, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц d_{min} . Частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте, называются suffозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта. Если окажется, что $d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} > d_{min}$, то грунт следует считать suffозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна d_{ci} — диаметра suffозионных частиц. Если окажется, что $d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} < d_{min}$, то грунт следует считать несuffозионным. Из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы — $d_{3\%}, d_{5\%}$. Диаметр максимального фильтрационного хода определяется следующими зависимостями (с учетом сегрегации грунта):

$$d_0^{max} = xC \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (1)$$

где x — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности suffозии.

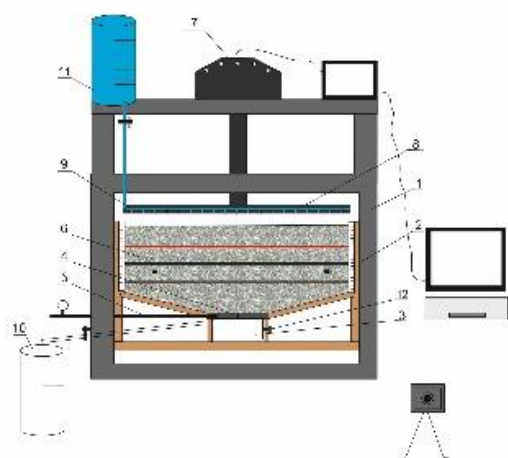
Другим критерием несuffозионности грунта является выполнение условия:

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \quad (2)$$

$$\text{где } N = 0,10 \sqrt[6]{C_u} (2 + \sqrt{C_u}) \frac{n}{1-n}, \quad (3)$$

Зону структурного элювия на территории Бугульминского плато по всем признакам относится к скальным грунтам трещиноватых массивов. В таких грунтах при расчете suffозионности преобладающее значение имеют параметры трещиноватости массива. Во время полевого маршрутного обследования на характерных участках были заложены, описаны и задокументированы площадки трещиноватости для расчета геометрических параметров трещин, размеров отдельностей и т.п. согласно СП 23.13330.2018, ГОСТ 25100-2020.

Недостатком вышеописанного расчетного способа является то, что в реальных условиях процесс suffозии может иметь быстро затухающий характер. Это может происходить как за счет отсутствия условий для транспортировки продуктов suffозии, так и за счет явления коагуляции, поэтому важным является вопрос определения критических параметров трещин для каждой разновидности гранулометрического состава дисперсной части элювия. Для решения этой задачи авторами были проведены экспериментальные исследования на установке собственной разработки (патент № 2022110200 от 15.04.2022 МПК-2022.01 G01N 3/10 «Устройство для определения suffозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования»), показанной на рисунке 7.



Описание схемы устройства:

- 1 – рабочая прозрачная камера;
- 2 – suffозионный лоток;
- 3 – прозрачный грунтоборник;
- 4 – раздвижная полая щель;
- 5 – регулятор раскрытия щели;
- 6 – исследуемый грунт;
- 7 – электромеханическое вертикальное нагружающее устройство;
- 8 – нагрязочный штамп;
- 9 – система капельного полива;
- 10 – мерная емкость;
- 11 – напорный бак;
- 12 – датчик мутности.

Рис. 7. Схема устройства для определения suffозионной устойчивости грунтов
Отличием установки от аналогичных является то, что моделирование процесса suffозии на

трещиноватом скальном массиве производится в экспериментальном лотке больших размеров (1м x 1м x 0,25м), в нижней части которого имеется раздвижная полая щель с возможностью плавного изменения ширины ее раскрытия в процессе эксперимента без прерывания процесса фильтрации. Таким образом, в процессе эксперимента для грунтов различного гранулометрического состава имеется возможность инструментальной фиксации двух величин – начальной ширины раскрытия трещины t_0 , соответствующей активизации суффозионного выноса самых мелких частиц, и критической ширины раскрытия t_{cr} , при достижении которой процесс суффозии приобретает незатухающий характер. В таблице 2 приведены осредненные результаты обработки параметров гранулометрического состава и рассчитываемых на их основе величин. Видно, что условие (2), выполняется для грунтов с коэффициентом неоднородности C_u менее 8. Диапазон $C_u=8-10$ можно считать переходным между суффозионно устойчивыми и суффозионно неустойчивыми грунтами. Это хорошо коррелируется и с результатами модельных исследований в экспериментальной установке. Для грунтов с коэффициентом неоднородности более 8 наблюдается более чем двукратный рост значения как начальной ширины раскрытия трещины t_0 , так и критической ширины раскрытия t_{cr} . Как можно видеть из Таблицы 2, для этого диапазона также характерно резкое изменение диаметра наибольшего фильтрационного хода в грунте d_{ci}^{max} с 0,20 в предыдущем диапазоне до 0,44. Далее вплоть до грунтов с коэффициентом неоднородности менее 16 это изменение имеет незначительный характер. А для грунтов с $C_u=16-30$ параметр d_{ci}^{max} отличается от значений в диапазоне $C_u=10-16$ в 2–4 раза. Результаты экспериментальных исследований показали, что существенное изменение критической ширины раскрытия трещины t_{cr} наблюдается лишь для грунтов с коэффициентом неоднородности более 20.

Таблица 2 – Суффозионность грунтов бесструктурного элювия (Зона А)

Cu	Размер частиц d, мм				d ₅ /d ₁₇	N	c	d ₀ max, мм	d _{ci} max, мм	t ₀ , мм	t _{cr} , мм
	d ₅ .м м	d ₁₀ .м м	d ₁₇ .мм	d ₆₀ .мм							
0.0-2.0	0.15	0.17	0.23	0.33	0.66	0.03	0.15	0.04	0.03	0.1	0.4
2.0-4.0	0.11	0.12	0.15	0.38	0.70	0.05	0.24	0.05	0.04	0.1	0.4
4.0-6.0	0.08	0.12	0.19	0.64	0.41	0.09	0.41	0.13	0.10	0.2	0.4
6.0-8.0	0.18	0.21	0.25	1.60	0.72	0.13	0.31	0.24	0.20	0.2	0.4
8.0-10.0	0.03	0.11	0.16	1.50	0.19	0.27	1.02	0.53	0.44	0.4	1.0
10.0-12.0	0.05	0.12	0.18	1.70	0.29	0.29	1.09	0.64	0.49	0.5	1.1
12.0-14.0	0.04	0.12	0.14	2.00	0.29	0.36	1.20	0.67	0.51	0.5	1.2
14.0-16.0	0.03	0.08	0.10	1.50	0.30	0.42	1.44	0.59	0.46	0.6	1.4
16.0-18.0	0.03	0.07	0.11	1.65	0.27	0.59	1.81	1.00	0.77	0.7	1.3
18.0-20.0	0.03	0.10	0.11	2.80	0.27	0.76	2.15	1.25	0.95	0.9	1.4
20.0-22.0	0.10	0.13	0.20	2.80	0.49	0.52	1.65	1.53	1.18	0.9	2.0
22.0-24.0	0.10	0.16	0.25	3.10	0.40	0.44	1.49	1.58	1.21	1.1	2.1
24.0-26.0	0.03	0.13	0.15	3.50	0.20	0.72	2.06	1.70	1.30	1.2	2.0
26.0-28.0	0.10	0.14	0.16	4.00	0.63	0.78	2.19	2.07	1.60	1.5	2.2
28.0-30.0	0.08	0.16	0.18	4.7	0.44	0.82	2.25	2.46	1.89	1.5	2.4

Для таких грунтов, по всей видимости, суффозионность должна оцениваться по отличным от предлагаемых в существующих методиках формулам. Для ориентировочной оценки суффозионной опасности грунта для изучаемой территории можно придерживаться данных условий: если $C_u > 16$ грунт следует считать суффозионным, $C_u = 10-16$ переходные, $C_u < 8$ грунт следует считать несуффозионным.

На этапе полевых исследований в различных частях исследуемой территории было заложено и изучено 182 площадки трещиноватости. На основании полученных материалов все результаты

были объединены в группы по степени трещиноватости согласно ГОСТ 25100–2020. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3– Значения степени трещиноватости массива (зона Г, В, Б)

Степень трещиноватости	Количество площадок трещиноватости, шт	Средние значения Rс, МПа	Модуль трещиноватости, М, %	Коэффициент трещинной пустотности, Ктп, %	Ширина раскрытия трещин, t, м
Очень слаботрещиноватые (Зона Г)	49	80÷120	<1,5	0,0÷0,09	0,01÷0,48
Слаботрещиноватые (Зона В)	41	50÷80	1,5÷5,0	0,1÷0,5	0,1÷1,0
Среднетрещиноватые (Зона В)	45	10÷50	5,0÷10,0	0,6÷2,1	0,5÷2,5
Сильнотрещиноватые (Зона Б)	47	<10	10,0÷30,0	2,2÷3,5	0,5÷4,5

Это позволило в первом приближении выполнить районирование исследуемой территории по степени трещиноватости пород.

На основании объединенных данных полевых и лабораторных исследований, выполненных расчетов и результатов моделирования были построены серии карт в программной среде ArcMap 10.8: карта распространения мощности элювия; карта уклона поверхности; карта четвертичных отложений; геологическая карта; карта распространения суффозионных и карстово-суффозионных воронок; карта неоднородности грунта бесструктурного элювия; карта степени трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия. На основании объединенных данных была построена карта совместных факторов проявления суффозии, представленная на рисунке 8. Анализ полученных карт позволил выполнить геолого-геоморфологическую типизацию территории с последующей инженерно-геологической характеристикой:

Аккумулятивная пойма. Современные аллювиальные образования слагают поймы и русла всех рек района (абс. отм. 40–70 м). Основными крупными реками являются Ик, Степной Зай, Дымка, Шешма. Общая мощность аллювия крупных рек колеблется от 10 до 25 м, средних и малых от 7 до 16 м. Подстилающие горные породы: отложения неогена — пески и глины Карстово-суффозионные процессы не развиты в данном типе рельефа и отсутствуют элювиальные карбонатные породы.

Эрозионно-аккумулятивные террасы рек. Террасы рек сложены аллювиальными отложениями, располагающиеся на низких террасах рек (первая и вторая). Мощность аллювия в долинах крупных рек достигает 14-22 м, малых и средних 9,0-18 м. Подстилающими породами служат отложения неогена, отложения уфимского и казанского ярусов пермской системы. Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст. Количество воронок 370 шт. Наибольшие пораженные участки наблюдаются вдоль речной долины рек Ик, Шешма, Степной Зай, длиной более 35 км, вытянутые вдоль первой и второй надпойменных террас (абс. отметки 70–110 м). Дно воронок чаще всего заболочено или приурочены к озерам. Самые крупные формы (d=30–120 м). Уклон поверхности составляет 1-3°. Средняя плотность воронок составляет 0,22 шт/км². Пораженность территории провалами – 1,3 м²/км². На территории отсутствуют элювиальные карбонатные породы, в результате переуглубления долин рек и смыва отложений. Территория по карстово-суффозионной опасности относится к умеренно опасной (по методике Рагозина А.Л. (2003 г.).

Эрозионно-аккумулятивные нижние части склонов. Сложены аллювиально-делювиальными отложениями, располагающиеся на высоких террасах крупных рек (нерасчлененные третья и

четвертая) или же представлены как нижние части склонов вдоль террас малых рек (абс. отметки 100–140 м). Подстилающие породы — частично отложения уфимского яруса и преимущественно казанского яруса пермской системы. Поверхность нижней части склонов сложена маломощной толщей аллювиально-делювиальных отложений до 1,5 м. Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст и проявления на отдельных участках процесса суффозии. Количество суффозионных воронок – 137 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Карстовые формы расположены чаще в склоновой части долин рек. Уклон поверхности составляет 3–6°. Плотность воронок – 0,1 шт/км². Пораженность территории провалами – 0,65 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной (по методике Рагозина А.Л (2003 г.)). Мощность элювия на данных участках до 1,5 м. Наибольшая суффозионная опасность развита вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участок характеризуется высокими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u=19-30$), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к средне- и сильнотрещиноватым.

Эрозионные поверхности средней части склонов. Сложены делювиально-пролювиальными и элювиально-делювиальными отложениями, располагающимися на длинных пологих склонах долин рек Ик, Дымки, Ютаза, Степной Зай и др. на различных гипсометрических уровнях от 140 до 180 м. Мощность делювиально-пролювиальных образований чаще всего составляет 3,0–5,0 м, иногда может увеличиваться до 10–15 м. Подстилающие породы – преимущественно отложения казанского яруса. Для этого типа рельефа характерны суффозионные и карстово-суффозионные процессы. Количество воронок – 124 шт. Распределение провалов на территории неравномерное, воронки преимущественно имеют конусообразную форму. Уклон поверхности составляет 6–10°. Плотность воронок – 0,11 шт/км². Пораженность территории провалами – 0,66 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной (по методике А.Л. Рагозина (2003 г.)). Мощность карбонатного элювия от 1,5 до 4,1. Наибольшая суффозионная опасность развита вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участок характеризуется высокими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u=19-30$), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к средне- и сильнотрещиноватым.

Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов. Приводораздельные части склонов сложены преимущественно элювиально-делювиальными отложениями. Они слагают верхние части склонов речных долин и склоны водоразделов на различных гипсометрических уровнях от 180 до 260 м. Состав элювиально-делювиальных образований в значительной мере определяется свойствами подстилающих пород преимущественно казанского яруса. Для этого типа рельефа характерны суффозионные и реже карстово-суффозионные процессы. Количество воронок – 102 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму. Уклон поверхности составляет 10–28°. Плотность воронок – 0,06 шт/км². Пораженность территории провалами – 0,65 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к незначительно опасной (по методике Рагозина А.Л (2003 г.)). Мощность элювиальных отложений от 4,1 до 6,0 м. Территория характеризуется низкими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u=0-10$), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к очень слаботрещиноватым.

Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов. Грунтовые толщи изучаемой территории сложены преимущественно элювиальными отложениями с разной мощностью распространения. Наименьшие мощности, не превышающие обычно первых метров, характерны для элювиальных отложений, развитых на высоких водоразделах (верхнее плато) с абс. отм. 260–370 м. Наибольшая мощность элювиальных отложений наблюдается на территориях низких

водоразделов (нижнее плато) с абс. отм. 220–280 м с мощностью от 4,1 до 6,0 м. Подстилающие породы — преимущественно казанского яруса и частично на высоких водоразделах уржумского яруса. Для этого типа рельефа характерно активное протекание суффозионных процессов. Количество воронок – 418 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму. Уклон поверхности составляет 0-3°. Плотность воронок – 0,1 шт/км². Пораженность территории провалами 0,58 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной (по методике Рагозина А.Л. (2003 г.)). Территория характеризуется низкими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u=0-10$), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к очень слаботрещиноватым.

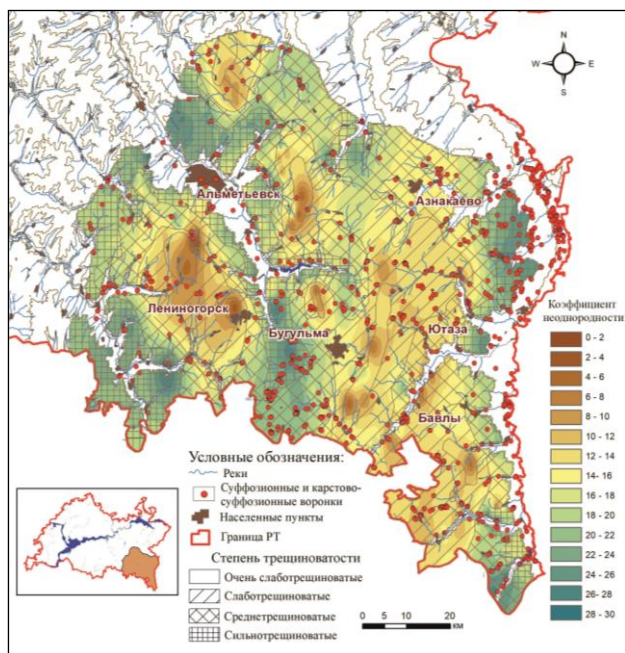


Рис.8. Карта совместных факторов проявления суффозии

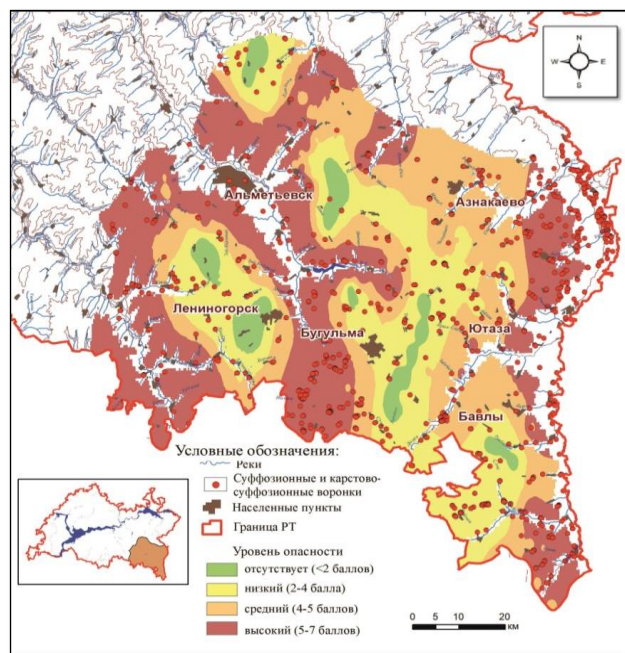


Рис.9. Интегральная карта суффозионной опасности

Для создания растрового покрытия интегральной карты (рис.9.) суммировались полигональные слои опасности проявления каждого фактора: растровое изображение неоднородности грунта бесструктурного элювия и степени трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия. При этом в каждом растровом изображении выделили классы «опасных» факторов в виде баллов. Границы классов определялись таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами. Интегральный риск территории подразделен на 4 класса по значениям балльной оценки: Первый класс – территории, с низким уровнем интегрального риска, обуславливающие возникновение суффозии от 0-2 балла; второй класс – территории со средним уровнем интегрального риска, значения от 2-4 балла; третий класс – территории с высоким уровнем интегрального риска, значения от 4 -5 баллов; четвертый класс – территории с очень высоким уровнем интегрального риска, значения свыше 5 баллов. Анализ карты показывает, что на изучаемой территории порядка 10% площади с низким уровнем интегрального, 19% территории подвержено среднему интегральному риску, 38% и 33 % территории подвержено высокому и очень высокому интегральному риску проявления суффозии и являются наименее благоприятными для строительства. Верификация полученной интегральной модели хорошо согласуется с прямыми наземными наблюдениями, а также внутренней непротиворечивостью сделанных выводов и их согласованностью. По полевому обследованию общее количество зафиксированных суффозионных и карстово-суффозионных воронок составляет

1151 шт. Пространственно и геометрически совпадают с изучаемой площадью 882 воронки. Результат пространственного анализа выражен в статистическом распределении поверхностных карстово-суффозионных форм по выделенным классам опасности. Тем самым можно отметить, что большая часть карстово-суффозионных форм преимущественно относится к участкам 4 и 3 класса опасности (748 шт. или 84%). Наименьшее количество карстово-суффозионных форм (130 шт. или 15%) развито на территории со средним уровнем интегрального риска (2 класс). На территориях с низким уровнем (1 класс) опасности зафиксировано всего 0,5% от общего числа воронок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, заключаются в следующем:

1. Установлено, что формирование карбонатного элювия на сводовых поднятиях Бугульминского плато осуществлялось в условиях холодного маловлажного климата, определяющего характер гипергенных преобразований карбонатных пород. Сохранность профиля молодых кор выветривания определялась несколькими факторами: 1) их расположением в пределах пологих вершин водоразделов; 2) геологическим временем формирования (на террасах склонов породы более длительное время подвергались процессам выветривания, чем на вершинах); 3) развитием речных долин, участвующих в смывах элювиальных отложений.

2. Выявлено, что на выположенных водоразделах Бугульминского плато широко развиты карбонатные молодые коры выветривания, в которых хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных пород.

3. По результатам литолого-минералогических исследований элювиальные отложения были подразделены на две разновидности современных элювиальных кор выветривания, представленные известняками и доломитами. В результате было установлено, что на физические и механические свойства элювиальных карбонатных грунтов большое влияние оказывает состав и структура исходных карбонатных пород, определяющее сопротивление материнской породы к выветриванию.

4. Впервые были построены карты распространения карбонатного элювия в пределах Бугульминского плато с обозначением его мощности, интенсивности трещиноватости, степени неоднородности, с пространственным расположением суффозионных и карстово-суффозионных воронок.

5. Предложен подход к оценке развития суффозионных процессов в дифференцированных профилях молодых кор выветривания, основанный на интегральной оценке ряда параметров суффозионности бесструктурных элювиальных грунтов и параметров трещиноватости структурного элювия. Данный подход представляется перспективным с точки зрения полноты учета большинства определяющих факторов.

6. Выполненное исследование позволило расширить представления о распространении элювиальных карбонатных грунтов на территории Бугульминского плато, а также связанных с ними суффозионных процессов. Выявленные закономерности изменчивости физико-механических свойств и минерального состава элювиальных карбонатных грунтов, может быть полезным при градостроительном планировании, выполнении инженерно-геологических изысканий.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список основных публикаций по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Интегральная оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, **А. Н. Гараева**, О. В. Лунева, Э. А. Королев // Геоэкология. – 2022. – №6. – С. 37-46.
2. Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, **А. Н. Гараева**, О. В. Лунева // Регулярный научный журнал Охотинского общества грунтоведов «Грунтоведение». – 2022. – №1.(18). – С. 31-43.

В изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования:

3. Особенности кольматации порового пространства в напряженно-деформируемых глинистых коллекторах / **А. Н. Гараева**, Э. А. Королев, М. Г. Храмченков // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №8. – С. 72-74.
4. Mathematical Modeling and Experimental Study of Erosion-Deposition Process in Deformable Porous Media / E. Khranchenkov, M. Khranchenkov, D. Demidov, and **A. Garaeva** // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. – Vol. 42. – No. 11. – p. 2545-2553.

В сборниках статей и материалах конференций:

5. Карбонатные элювиальные грунты Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, **А. Н. Гараева**, Э. А. Королев // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта –1 апреля 2022 г.). – Москва: изд-во «ГеоИнфо»., 2022. – В. 23. – С. 78-84.
6. Инженерно-геологическая характеристика молодых кор выветривания эрозионно-денудационных останцев Бугульминского плато юго-востока Татарстана / **Гараева А. Н.**, Латыпов А. И. // XXVI Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета., 2022. – Т. 1. – С. 239-241.
7. Особенности карстования карбонатных массивов Бугульминского плато Республики Татарстан / **А. Н. Гараева**, А. И. Латыпов, Э. А. Королев // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: (14-я Межрегиональная научно-практическая конференция, Уфа, 23—26 мая). – Москва: Изд-во «Перо»., 2022. – С. 28-33.
8. Элювиальные отложения эрозионно-денудационных останцев Бугульминско-Белебеевской возвышенности / **Гараева А. Н.**, Латыпов А. И., Зарипова Д. Р. // Сборник статей всероссийской молодёжной конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий». – Москва: Издательство «Перо»., 2021. – С. 16-20.
9. Особенности гипергенного преобразования карбонатно-терригенных пород Бугульминско-Белебеевской возвышенности / **Гараева А. Н.**, Латыпов А. И., Зарипова Д. Р. // Геологические науки – 2021: Материалы Всерос. научно-практ. конф. (Саратов, 2 - 3 декабря 2021 г.). – Саратов: Издательство «Техно-Декор»., 2021. – С. 49-53.
10. Оценка трещиноватости массивов оснований сооружений Альметьевского района Республики Татарстан / **Гараева А. Н.**, Хабибуллин И. Р. // В сборнике: Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь: ПГНИУ., 2022. – С. 289-293.