

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Латыпов Айрат Исламгалиевич

Казань 2023

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ	11
1.1 История изучения основных закономерностей распространения и физико- механических свойств элювиальных грунтов.....	11
1.2 История изучения геологического строения и четвертичных отложений Республики Татарстан.....	19
1.3 Зарубежные инженерно-геологические исследования кор выветривания.....	22
Выводы по первой главе	24
ГЛАВА 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ	25
2.1 Краткое описание геологического строения территории.....	25
2.2 Опасные инженерно-геологические процессы.....	35
Выводы по второй главе	44
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ	45
3.1 Факторы формирования и пространственное распространение элювиальных грунтов.....	45
3.2. Строение профиля молодых кор выветривания.....	52
3.3 Пространственное распространение элювиальных грунтов.....	55
Выводы по третьей главе	60
ГЛАВА 4. СОСТАВ И СВОЙСТВА КАРБОНАТНЫХ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ	61
4.1 Инженерно-геологические свойства и классификация элювиальных грунтов.....	61
4.2 Минеральный и химический состав.....	66
Выводы по четвертой главе	74
ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ	76
5.1 Количественная оценка суффозионности грунтов бесструктурного элювия.....	77
5.2 Оценка трещиноватости грунтовых массивов зоны структурного элювия.....	85
5.3 Экспериментальные исследования развития процесса суффозии.....	90
5.4 Интегральная оценка суффозионной опасности территории.....	96
Выводы по пятой главе	107
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111

Введение

Актуальность темы исследования. Элювиальные отложения, формирующие молодые коры выветривания, в последнее время вызывают повышенный интерес у геологов различной прикладной направленности. С одной стороны это связано с наличием в них полезных ископаемых, с другой – с использованием их в качестве оснований инженерных сооружений. С последним случаем связано изучение территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, расположенное в юго-восточной части Республики Татарстан.

Элювиальные грунты зоны гипергенеза обладают высокой степенью структурной неоднородности, склонностью к механической и химической суффозии, снижением прочности и увеличением сжимаемости при водонасыщении, дроблением крупнообломочных частиц элювия под воздействием строительных нагрузок от некоторых сооружений, что обуславливает их принадлежность к категории специфических грунтов согласно СП 22.13330.2016, требующих дополнительных инженерно-геологических исследований. 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.

Территория Бугульминского плато характеризуется высокой антропогенной нагрузкой: в данной части РТ расположено несколько крупных городов, разрабатываются крупнейшие месторождения нефти, такие как Ромашкинское, Ново-Елховское, Шугуровское, 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. Высокая степень суффозионной неустойчивости, сильная трещиноватость карбонатных грунтов способствуют риску возникновения различных аварийных ситуаций. Проявление суффозии на территории приводит к появлению поверхностных и подземных эрозионных форм - проседанию вышележащей толщи и образованию западин - суффозонных воронок, блюдец, впадин, а также карстово-суффозионных форм – провальных воронок, полостей.

В качестве примера негативных последствий развития суффозионных процессов на исследуемой территории в диссертационном исследовании использована статистика компании ПАО «Татнефть» о деформации нефтепроводов и сопутствующих линейных коммуникаций вследствие выноса карбонатных элювиальных грунтов.

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. Полюнова (1934 г.), В.Т. Трофимова (1977 г.), Г.А. Голодковской (1968 г.), И.И. Гинзбурга (1946 г., 1947 г.), Л.А. Ярм (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. Ярм (1991 г.), Б.Б. Полюновым (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. Ярм (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, особенности 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 территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, выполняемых автором на протяжении нескольких лет. Рекогносцировочное обследование территории, маршрутные наблюдения, отбор образцов осуществлялись самим автором в период с 2019 по 2022 гг. 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») с соблюдением методик по лабораторному определению коэффициента фильтрации грунтов (ГОСТ 25584-2016), методики определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений (ВНИИГ, 1945 г). 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)», инженерно-геологические колонки – в «CoreDRAW». Обработка результатов экспериментальных исследований проведена с использованием программы «Microsoft Excel».

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, интенсивности трещиноватости, степени неоднородности, с распространением суффозионных и карстово-суффозионных воронок.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

а) в существенном расширении существующих 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.

Личный вклад автора в работу.

Автор принимал личное участие в сборе, обработке и анализе данных о строении, составе, 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 выполнил моделирование 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.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследования обсуждались и докладывались автором на научно-практических конференциях и семинарах: на Сергеевских чтениях «Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения» (по материалам годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), на Всероссийской научно-практической конференции

«Геологические науки – 2021» (г. Саратов, 2021 г.), на Всероссийской молодежной конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий» (г. Москва, 2021 г.), на II международном научно-практическом форуме по природным ресурсам, окружающей среде и устойчивому развитию, NRES 2021 (г. Барнаул, 2021 г.), на 14-ой Межрегиональной научно-практической конференции «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий» (г. Уфа, 2022 г.), на XXVI Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2022 г.), на XV Международной научно-практической конференции «Геология в развивающемся мире» (г. Пермь, 2022 г.), на I Ежегодной международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы геологии и геофизики в системе современного естественно-научного знания» GЕoS 2022(г. Москва, 2022 г.).

Публикаций по теме диссертации – 10, из них 2 в журналах из перечня ВАК, в базах данных Scopus- 2.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своему научному руководителю кандидату технических наук, доценту А.И. Латыпову за предоставленное научное направление, за содействие в сборе материалов, ценные советы и замечания на каждом этапе исследования. Особую благодарность автор выражает научному консультанту, заведующему кафедрой общей геологии и гидрогеологии доценту, кандидату геолого-минералогических наук Э.А. Королеву за содержательные консультации и советы при выполнении диссертационной работы. Диссертант благодарен коллективу кафедры общей геологии и гидрогеологии за полученные знания, навыки, поддержку и отзывчивость. Автор признателен за консультации и помощь профессору, д.ф.-м.н М.Г. Храменкову, доценту к.ф.-м.н. А.А. Галееву, доценту к.г.-м.н Ескину А.А., инженерам Г.М. Ескиной, О.В. Луновой, Б.М. Галиуллину, Н.Н. Равиловой, О.Ю. Андрушкевичу. Диссертант выражает благодарность своей семье за помощь и поддержку.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

1.1. История изучения основных закономерностей распространения и физико-механических свойств элювиальных грунтов

Процессы выветривания, как правило, приводят к тому, что в относительно небольшом диапазоне глубин может меняться не только физико-механические свойства грунтов, но и полностью изменится их минеральный и петрографических состав.

В результате действия процесса выветривания образуется кора выветривания, в виде специфических геологических тел, представленные элювиальными породами, которые залегают преимущественно в верхней части разреза нередко становятся причиной появления недопустимых деформаций фундаментов зданий и сооружений. Согласно СП 22.13330.2016 [117] “Основания зданий и сооружений” под элювиальными грунтами понимают грунты, сложенные в результате выветривания скальных пород, оставшимися на месте своего образования и сохранившими в той или иной степени структуру и текстуру исходных пород. Данный литотип объединяют понятием «кора выветривания», которая может включать в себя самый широкий классификационный диапазон грунтов – от песчаных и пылевато-глинистых до трещиноватых скальных, кардинально отличающихся по прочностным и деформационным свойствам.

Тем самым изучение коры выветривания подразумевает использование специального подхода к ее изучению и особые требования к проведению инженерно-геологических изысканий. Л.А. Ярг [144] выделяет основные черты коры выветривания, которые не благоприятно могут влиять на инженерно-хозяйственную деятельность:

1. Разнообразие типов коры выветривания, обуславливающих различие форм геологических тел и условий их залегания, размытость их границ в площадном выражении.
2. Характерную зональность в строении кор выветривания в разрезе.
3. Невыдержанность кор выветривания ни по мощности, ни в латеральной плоскости, часто с отсутствием четких геологических границ.

4. Постепенный переход от признаков исходной материнской породы к признакам осадочных пород, формирующихся в приповерхностных условиях и в значительной степени определяющихся взаимодействием литосферы с химическими, физическими и биологическими раздражителями.
5. Наличие в относительно небольших по мощности грунтовых толщах полного разреза кор выветривания от трещиноватой скальной породы до полностью дисперсных пылевато-глинистых грунтов с разной степенью дисперсности, разуплотнения и выветрелости.
6. Изменение конфигурации, величины и пространственной структуры элементов толщи выветрелых грунтов от глыб до кристаллитов глин.
7. Существенная изменчивость прочностных, деформационных, фильтрационных и других свойств грунтов.

Перечисленные черты продуктов выветривания требуют применения комплекса методов с изучением как свойств образовавшихся пород, так и тех геологических процессов, которые послужили причиной образования элювия, скорость протекания которых нередко сопоставима со временем жизненного цикла здания или сооружения.

Первые научные статьи по данной теме были опубликованы в 1952 г. Н.В. Коломенским [62]. Бурное развитие исследований кор выветривания началось в период 60-80-х годов XX века и связано с фундаментальными исследованиями Е.М. Сергеева [110], Б.Б. Польшова [100-101], В.Т. Трофимова [60], Л.А. Ярг [144,145], Г.А. Голодковской [26], И.И. Гинзбурга [24], В.А. Макрыгина [73] и многих других. Основным посылом исследований можно считать то, что «строение и состав грунтовых толщ выветрелых пород непосредственно связаны с особенностями геологического строения территории».

Л.А. Ярг связывает развитие процесса выветривания с совокупностью региональных, зональных и техногенных факторов [11]. Рельеф и его расчлененность, гипсометрическое положение пород относительно базиса эрозии, трещиноватость, состав, структурно-текстурные особенности горных пород, раздробленность, тектоническая нарушенность создают условия для проникновения агентов выветривания» [11]. К агентам выветривания относятся: солнечное излучение, газовая компонента, атмосферные осадки, растительность, почва, колебания температур,

микроорганизмы (бактерии); техногенные условия. На рисунке 1.1 приведена разработанная Л.А. Ярг схема взаимодействия различных факторов.

Важное значение в формировании строения и мощности кор выветривания помимо региональных, зональных и техногенных факторов имеет фактор времени, в течение которого происходило выветривание. Так, И.И. Гинзбург выделяет в зависимости от времени формирования современную кору, представленную собственно элювием, и древнюю, сформированную в предшествующие геологические эпохи и погребенную под толщей позднейших напластований [24].

Выделением геологических типов кор выветривания с объяснением ряда особенностей протекающих геологических факторов с учетом тектонического фактора занимались В.Н. Разумова [105], А.Г. Черняховский [140]. Появление кор выветривания, особенно мощных, связывается со строго ограниченными определенными тектоническими структурами.

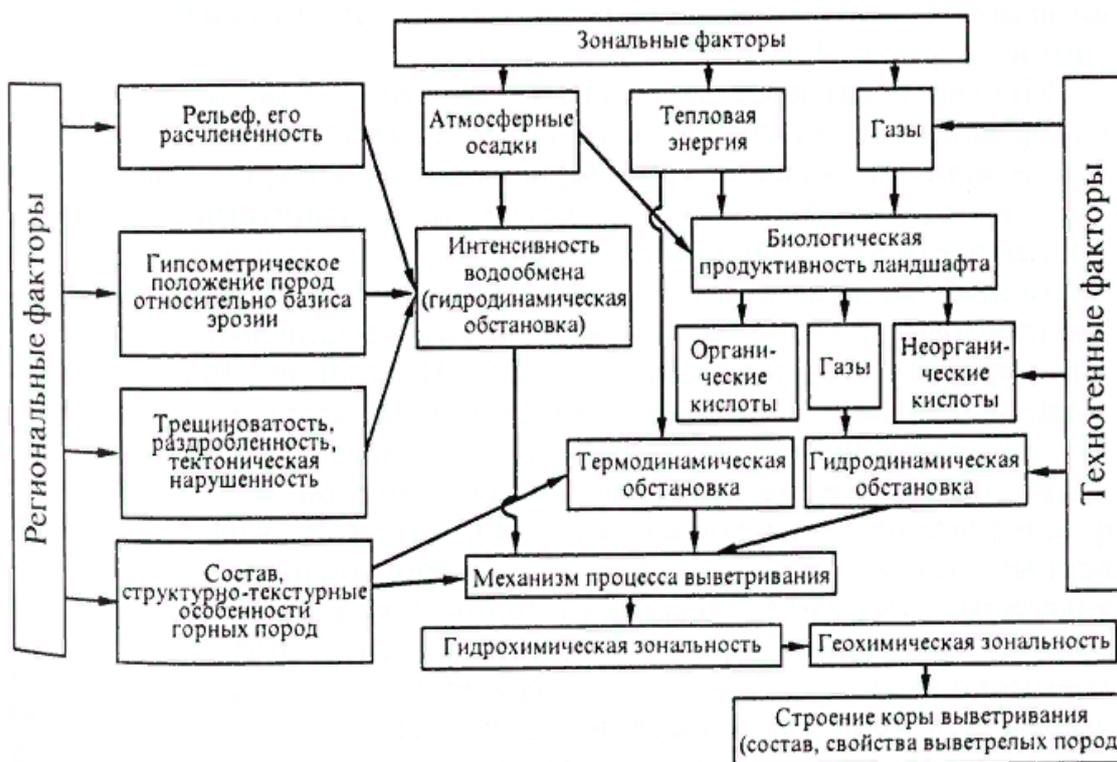


Рис.1.1 Схема взаимодействия зональных, региональных и техногенных факторов при формировании коры выветривания (Л.А. Ярг)

Коры выветривания были разделены на две основные группы: коры выветривания, возникшие в платформенных условиях, и коры выветривания, развившиеся в геосинклинальных складчатых областях [105].

Большинство исследователей на момент начала изучения проблемы считали (Г.А. Голодковская [26], И.И. Гинзбург [24] и др.), что коры выветривания развиваются только на платформах и являются типичными платформенными образованиями. Современные исследования свидетельствуют о том, что имеются случаи развития кор выветривания и в геосинклинальных условиях, которые описаны в работах В.П. Казаринова [6], Д.Г. Сапожникова [108], и др.. Авторы отмечают отсутствие единой формации коры выветривания. В особую формацию может быть выделена только кора выветривания основания осадочного платформенного чехла вместе с сопутствующими продуктами ближнего перемыва. Во всех остальных случаях коры выветривания являются лишь одним из парагенетических членов очень разнообразных формаций. На примере своих утверждений были изучены коры Южного Урала.

В зависимости от характера расположения зон различной выветрелости и геологического строения территории И.И. Гинзбург [24] выделяет: площадную структуру, линейную структуру и сложные структуры:

1. Площадная структура приурочена в основном к однородным магматическим и осадочным породам с четко выраженной вертикальной зональностью слоев и изометричностью в плане с закономерным возрастанием прочностных и деформационных свойств слагающих пород, а также увеличением количества крупнообломочных включений сверху вниз при залегании близко к горизонтальной кровле скальных грунтов. Площадная структура характеризуется относительно небольшой мощностью выветрелой зоны.
2. Линейная структура - приурочена в основном к тектоническим нарушениям или контактам пород, характеризуются вытянутостью по простиранию, горизонтальной зональностью выветривания, неравномерностью изменения физико-механических свойств и состава по глубине, частым переслаиванием и возможностью разложения более выветрелых пород под менее выветрелыми.
3. Сложные структуры - сочетают признаки линейной и площадных структур. Приурочены к местам больших тектонических нарушений в однородных массивах с наличием вертикальной и горизонтальной зональностей.

Также предложен подход к разделению коры выветривания на зоны геохимических критериев, в основу которого заложено влияние климатического

фактора на процесс выветривания. Среди геологов и геохимиков наиболее широким признанием пользуется схема И.И. Гинзбурга [24], А.Г. Черниховского [140]. В основу инженерно-геологического подхода положено, что процессы выветривания, продвигаясь вглубь, вызывают изменение физико-химического состояния пород и образуют определённые зоны выветривания, сочетания которых составляет профиль выветривания. При преобладании физического выветривания указанные в таблице зоны часто объединяются в зону интенсивного разрушения (верхнюю) и зону слабой дезинтеграции и трещиноватости (нижнюю). При преобладании химического выветривания - в зону химического преобразования и зону механической дезинтеграции.

Большинство исследователей отмечают наличие закономерности формирования зон выветривания в геологическом разрезе, особенностей их показателей состава и строения и существующую взаимосвязь между ними.

Схемы расчленения кор выветривания на зоны в инженерной геологии предложены Г.С. Золотаревым (1948, 1963 г.г.) [48], В.Б. Швецом, (1970 г.) [142], Л.А. Ярг (1991 г.) [145], М. Варгас (1953 г.) [14], Н.В. Коломенским (1949 г.) [61], Э.А. Джавахишвили (1962, 1970 г.г.) [40], В.Д. Ломтадзе (1970 г.) [69], И.И. Гинзбургом (1947 г.) [24]. Наиболее широко используются представленные схемы расчленения кор выветривания (таблица 1.1) в зависимости от вида выветривания, степени дезинтеграции и изменения физико-механических свойств пород в коре выветривания.

Обобщенно, выделяют грунты шести степеней выветрелости: VI - остаточные дисперсные грунты; V - полностью выветрелые скальные грунты; IV - сильно выветрелые скальные грунты; III - умеренно выветрелые скальные грунты; II - слегка выветрелые скальные грунты; I-0 - неветрелые скальные грунты (коренные породы). При описании ступени выветривания в качестве главных признаков принимают интенсивность изменения цвета; уменьшение прочности; процентное содержание, характер и степень выветрелости продуктов выветривания.

По мнению авторов, теоретически любая кора выветривания должна иметь зональный профиль, так как кислые почвенные растворы, просачиваясь вниз, постепенно усредняются или переходят в слабощелочные и щелочные растворы. В результате увеличения рН, а также изменения с глубиной концентрации солей в воде

Таблица 1.1 – Схема расчленения кор выветривания на зоны

Степень выветрелости	И.И. Гинзбург 1947г [24]	В.Д. Ломтадзе 1971г. [69]	Э.А. Джавахишвили, 1962, г. [40]	Н.В. Коломенский, 1949 г. [61]	М. Варгас 1953 г. [14]	Г.С. Золотарев, 1948г. [48]	В.Б. Швец, 1970г. [142]	Л.А. Ярг 1991г. [145]	Д.П. Прочухан 1965г. [97]	ГОСТ 25100-2020 [32]
V	-	-	-	-	-	-	-	Вторичной цементации	-	
IV	Интенсивного разрушения	Зернистая	Мелкодробления	Вторичной цементации	Поверхностная или пористая	Дисперсная	Глинистых продуктов	Дисперсная	Химического выветривания	А — зона сильного изменения
III	Зона слабой дезинтеграции	Мелкообломочная	Щебенчатая	Зернистая или мелкообломочная	Молодые или элювиальные грунты	Обломочная	Выщелачивания	Литомаж	Физического выветривания (обломочная отдельность)	Б — зона средней степени изменения
II	Трещиноватая	Грубообломочная глыбовая	Глыбовая	Глыбовая	Разрушенные породы	Трещиноватая	Дезинтеграции	Обломочная	Глыбовая	В — зона слабого изменения
I-0	-	Скрыто трещиноватая скальная порода	Скрыто трещиноватая	Монолитная	Скрыто трещиноватая скальная порода	Скрыто трещиноватая скальная порода	Слабо расчленения	Трещиноватая	Скрыто трещиноватая скальная порода	Г — сохранившийся массив

и уменьшения кислотного потенциала интенсивность процессов выветривания с глубиной ослабевает и изменяет характер процессов.

Таким образом, образование элювиальных грунтов сопровождается протеканием двух противоположных процессов: снижением или утратой унаследованной от исходной материнской породы прочности при физическом выветривании и приобретением новой структурной прочности.

Степень изменения физико-механических свойств элювиальных грунтов определяется в основном генетико-петрографическими особенностями материнских пород и интенсивностью протекания процесса выветривания. Выделяют несколько групп [48]:

- I. элювиальные грунты, сформировавшиеся на магматических интрузивных породах с полнокристаллической структурой;
- II. элювиальные грунты, образовавшиеся на магматических эффузивных породах с порфировой структурой;
- III. элювиальные грунты, сформировавшиеся на метаморфизованных магматических породах сланцевой структуры;
- IV. элювиальные грунты, образовавшиеся на метаморфизованных осадочных сцементированных породах по глинистым осадкам, песчаникам и туфопесчаникам;
- V. элювиальные грунты, сформировавшиеся на осадочных сцементированных неметаморфизованных породах [48].

По мере увеличения номера группы снижаются механические свойства элювиальных грунтов.

Изучение физико-механических свойств грунтов в свете проблемы их изменения в процессе выветривания имеет важнейшее значение для практики инженерной геологии. Решение данной проблемы нашло отражение в исследованиях Ф.П. Саваренского [106], Э.Р. Черняка [139], Н.В. Коломенского [63], Г.С. Золотарева [48], В.Д. Ломтадзе [69], Н.Н. Маслова [78], В.Б. Швеца [142], Ю.Д. Матвеева [79], Л.А. Ярг [99, 144], Е.Г. Чаповского [138]., Е.В. Сергеева [111], В.П. Маричева [77], Г.К. Бондарика [10], А.Г. Барановского [8], Г.М. Арешидзе, Э.А. Джавахишвили [7], И.М. Горькова [27], А.М. Конне [64], Ю.Д. Матвеева [79], И.В. Попова [101], В.А. Степанова [121].

Исследования В.И. Федорова [132], Е.Г. Чаповского [138] были направлены на получение характеристик механических свойств элювиальных крупнообломочных грунтов. К региональным работам можно отнести исследования В.П. Маричева [77] который занимался изучением взаимосвязи механических свойств элювиальных грунтов с их физическими параметрами. Результатом выполненных им исследований стали таблицы нормативных значений прочностных и деформационных свойств элювиальных глинистых грунтов города Челябинска.

В.Б. Швец [142] установил, что характер и степень изменения физико-механических свойств элювиальных грунтов при прочих равных условиях зависит в основном от интенсивности выветривания и генетико-петрографических особенностей исходных пород. Под его руководством были разработаны новые методики и экспериментальные установки для определения прочностных и деформационных характеристик элювиальных грунтов. Полученные результаты легли в основу многих нормативных таблиц физико-механических свойств элювиальных грунтов.

К фундаментальным исследованиям в области изучения изменчивости прочностных и деформационных параметров грунтов кор выветривания следует отнести работы Л. А. Ярг [144], которая связала прогноз временного изменения основных показателей физико-механических свойств грунтов с их изменчивостью по глубине. На основании прогнозных данных показана возможность корректировки показателей свойств грунтов с учётом возможного развития процесса выветривания.

Успехи в области лабораторных исследований выветрелых грунтов (стенды, моделирующие сдвиги, стабилометры, приборы сжатия-растяжения и т.д.) связаны с деятельностью В.Б. Швеца [142], В.Н. Широкова [143], Н.А. Цилюрик [137], Л.Г. Борейко [12]. Многие исследователи считают, что определяемые характеристики свойств несут в себе информацию об изменении геологической обстановки и последующих генетических изменениях геологической среды что позволяет на основании лабораторных исследований устанавливать границы зон кор выветривания.

К фундаментальным исследованиям состава и свойств элювиальных грунтов следует отнести работы Г.К. Бондарика [9-11], который установил многие зависимости изменчивости характеристик грунтов зон кор выветривания с серьезным

статистическим обоснованием. К заслугам Г.К. Бондарика следует отнести авторство теории геологических полей, основанной на физическом и математическом обосновании возможности использования поля определенного геологического параметра в решении задачи определения показателей физико-механических свойств грунта.

Многие выполненные исследования в нашей стране в настоящий момент положены в основу нормативных документов, справочников, региональных таблиц.

1.2. История изучения геологического строения и четвертичных отложений Республики Татарстан

Первые сведения о геологическом строении Поволжья и Прикамья находятся в работах Р.И. Мурчисона [86], впервые описавших пестроцветные отложения района и установивших их принадлежность к пермской системе и обнаружившего в Прикамье морские осадки каспийского типа. Важный вклад в изучение геологического строения района работ внес Н.А. Головкинский [25]. Он установил основные закономерности фациальных изменений пермских отложений, впервые установил цикличность в строении разрезов верхнепермских отложений.

К концу XIX и в первые десятилетия XX вв. трудами этих геологов, а также работами А.Н. Мазаровича [70,71] и др. были сформулированы основы стратиграфической классификации горных пород исследуемого региона с выделением в их составе геологических ярусов, пачек и других подразделений.

Огромный вклад в изучение стратиграфии верхнепермских отложений внес профессор М.Э. Ноинский [90]. На основании детального описания и расчленения печищинского разреза он выявил явление цикличности для отложений казанского яруса.

Систематическое изучение геологического строения территории началось в 30-е годы XX столетия. Под руководством М.Э. Ноинского и частично В.А. Чердынцева развернулись работы по геологической съемке на территории Татарстана. Результаты этих исследований опубликованы в монографии «Геология Татарской АССР и прилегающей территории в пределах 109-го листа», в которой изложены сведения по стратиграфии, литологии, тектонике, гидрогеологии, геоморфологии.

История изучения четвертичных отложений территории Татарстана насчитывает более 150 лет. Еще в труде Р. Мурчисона [86] с соавторами упомянуты и показаны на карте в долинах Средней Волги и Нижней Камы «послетретичные» каспийские отложения. Н.А. Головкинский [25] выделил на Средней Волге две террасы – надлуговую и верхнюю; последнюю он считал морской каспийской. Н.А. Головкинский [25] впервые связал образование речных террас с колебательными движениями земной коры, и это «правило» получило широкое признание.

В 30-х годах в Среднем Поволжье, включающем и Татарстан, провели исследования экспедиции АН СССР и Комиссии по изучению четвертичного периода, внесшие значительный вклад в изучение отложений этого периода. Г.Ф. Мирчинк [83] ввел альпийскую стратиграфическую схему с тремя ледниковыми эпохами и тремя соответствующими им речными террасами. Е.В. Шанцер [141] обосновал стратиграфическое значение погребенных в делювии почв, собрал обширный материал для последующего фациального расчленения аллювия равнинных рек.

В ходе завершенной в 30-х годах 10-верстной геологической съемки 109 листа, включающего большую часть территории Татарстана, а также более детального изучения ряда районов республики, был собран большой материал о четвертичных отложениях, обобщенный Е.И. Тихвинской [130].

В ее работе впервые проведено стратиграфическое и генетическое расчленение четвертичных отложений [81-82,84,88], основная роль в их формировании отведена смене ледниковых и межледниковых эпох и колебательным тектоническим движениям, доказан дочетвертичный возраст приказанского участка Волжской долины. В 1973 г. А.П. Дедковым [36-39], О.Н. Малышевой [75] составлена карта четвертичных отложений Татарской АССР в масштабе 1:500000. Богатый фактический материал и новые представления о геологическом строении неогеновых и четвертичных толщ получены в 1970-80 гг. В результате исследований В.И. Аверьянова [2] проведена детальная стратиграфия разрезов, изучены литологические и инженерно-геологические свойства верхней части неогеновых и особенно четвертичных образований.

Во второй половине XX столетия значительно расширился диапазон и возросла интенсивность исследований четвертичного покрова республики. Именно в этот период были получены наиболее существенные результаты генетического и

стратиграфического расчленения четвертичных отложений, выявлены многие особенности и закономерности их литолого-фациального состава, условий формирования и распространения. Особенно резко возрос интерес к изучению древней долинной сети рассматриваемой территории и синхронного ей аллювия, что нашло отражение в появлении довольно многочисленных работ, полностью или частично посвященных этому вопросу [6, 28, 29, 59, 102,126]. Этому способствовал и широкий размах структурно-геологических съемок, проводившихся еще в предвоенные и военные годы, и начавшееся в конце 1940-ых годов проектирование и строительство гидроэлектростанций Волжского каскада.

В геолого-геоморфологических работах принимают участие (В.А. Полянин [102], О.Н. Малышева [75], А.П. Дедков [36], Г.П. Бутаков [13] и др.) Большой материал собран в ходе геолого-съемочных работ различных масштабов, проводимых Татгеолтрестом, Средневолжской экспедицией, Гидропроектом. Усилились литологические и геоморфологические исследования, для стратиграфического расчленения отложений широко используются новые методы, особенно палинологический и палеомагнитный. Закономерными явились постепенный отход от альпийской схемы и более глубокий анализ региональных особенностей четвертичных образований.

Среди многочисленных работ о четвертичных отложениях выделяется ряд монографий. Четвертичный литогенез в долинах Волги и Камы, рассмотренный В.А. Поляниным [102], отразил новые подходы к стратиграфии четвертичных отложений. Детальнейший анализ строения погребенных аллювиальных свит Волги и Камы содержат две монографии Г.И. Горецкого [28-29]. Монография Г.П. Бутакова [13] содержит всесторонний анализ особенностей плейстоценового перигляциального морфо- и литогенеза. Одним из последних серьезных обобщений сведений о четвертичных отложениях является коллективная монография «Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника», выполненная силами академических и производственных организаций Республики. Возросла прикладная направленность исследований четвертичных образований (Гидропроект, инженерные изыскания, поиски нерудных ископаемых, геоэкологические проблемы).

К настоящему времени почти вся территория Республики Татарстан покрыта инженерно-геологической съемкой масштаба 1:200 000 [44,55,76,80]. В результате

геологосъемочных работ масштаба 1:200000 установлены тектонические и геоморфологические особенности территории, описаны её гидрогеологические и инженерно-геологические условия.

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. Систематическими исследованиями инженерно-геологических свойств элювиальных грунтов на изучаемой территории занимаются частные инженерно-геологические и строительные компании при проведении инженерно-геологических изысканий и проектировании различных сооружений. При этом отсутствует какая-либо база данных физико-механических свойств, подход к региональной оценке инженерно-геологических условий территорий, сложенных элювиальными грунтами. Это обуславливает необходимость изучения кор выветривания для дальнейшего использования полученных результатов при решении прикладных задач инженерной геологии, в том числе мер инженерной защиты от развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов.

1.3. Зарубежные инженерно-геологические исследования кор выветривания

Началом инженерно-геологического изучения элювиальных грунтов за рубежом можно считать 1950-е годы. Основоположниками стали американский ученый У. Келлер, немецкий ученый Г. Гаррасовиц, шведский ученый О. Тамм.

Большинство исследований направлено на поиск закономерностей характеристик выветривания в различных зонах и районах Derakhshan-Babaei, Nosrati, Tihomirov (2020г.) [150], Meyer, Kuhwald, Petersen & Duttman (2021 г.) [156], A.L. Little, (1969 г.) [154], Blight G.E., Leong E.C.(2012 г) [148], Jworchan I.(2006 г) [154], Asmaa G.S. (1988г), [146]. Другая часть изучает влияние процессов выветривания на развитие неблагоприятных факторов для проектирования и строительства, без количественной оценки изменения физико-механических свойств самих элювиальных грунтов Xiaolidong, Cohen, Martin [161], McLaughlin, BradMurray, Ward, Flint & Heffernan, (2019 г.) [154], Irfan T.Y (1996 г), [153]. Также можно встретить работы в материалах различных конференций с решением конкретной узкой задачи Startsev & Kasetsart, (1985 г.) [158], Ziangiurov & Kashirskii, (2005 г.) [165], Mayne P (2001 г.)

[155], Meyer N, Kuhwald M, Petersen J et al (2021 г.) [156], Yongsheng Cheng (2012 г.) [162].

Принципиально подход к изучению кор выветривания при инженерно-геологических исследованиях в разных странах мало чем отличается от российских исследований. Основные различия связаны лишь с используемой терминологией. В качестве примера можно привести стандарт Великобритании BS 5930:2020 [149], основанный на качественном описании интенсивности выветрелости скальных грунтов по сравнению с материнской породой. Согласно стандарту, различают шесть степеней выветрелости: I – невыветрелые скальные грунты (коренные породы), II - слегка выветрелые скальные грунты; III - умеренно выветрелые скальные грунты, IV - сильно выветрелые скальные грунты, V - полностью выветрелые скальные грунты, VI - остаточные дисперсные грунты [149]. Стандарты других стран применяют схожий подход.

Большинство зарубежных исследований направлено на оценке влияния того или иного фактора, такого, как минеральный или петрографический состав, трещиноватость, характеристики структуры и текстуры, процентное содержание компонентов (в основном, глины) на инженерно-геологическую оценку массивов элювиальных грунтов.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. Исследованиями кор выветривания занимаются по всему миру уже на протяжении нескольких десятилетий. При этом можно утверждать об отсутствии в работах исследователей универсального описания единого профиля выветривания. Можно говорить о характерных профилях (зонах) выветривания соответственно для районов с преобладающим развитием физического, химического или смешанного процессов выветривания, достаточно различных в зависимости от петрографических особенностей исходных пород, продолжительности и скорости выветривания, соотношения скорости выветривания и денудации.

2. К основным факторам, оказывающим непосредственное влияние на инженерно-геологические особенности элювиальных грунтов, большинство исследователей относят минеральный и петрографический состав, трещиноватость, структуру и текстуру кор выветривания, степень выветрелости и процентное содержание глинистой компоненты.

3. В районах распространения элювиальных грунтов развитие большей части экзогенных геологических процессов напрямую связано с процессом выветривания. При этом интенсивность выветривания напрямую связана с активностью антропогенной деятельности.

4. На сегодняшний день серьезные исследования элювиальных грунтов на территории Бугульминского плато отсутствуют. Систематическими исследованиями инженерно-геологических свойств элювиальных грунтов на изучаемой территории занимаются частные инженерно-геологические и строительные компании при проведении инженерно-геологических изысканий и проектировании различных сооружений. При этом отсутствует какая-либо база данных физико-механических свойств, подход к региональной оценке инженерно-геологических условий территорий, сложенных элювиальными грунтами. Это обуславливает необходимость изучения кор выветривания для дальнейшего использования полученных результатов при решении прикладных задач инженерной геологии, в том числе мер инженерной защиты от развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов.

ГЛАВА 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ

2.1. Краткое описание геологического строения территории

Бугульминское плато расположено в южной части Бугульмиско-Белебеевской возвышенности в юго-восточной части Республики Татарстан на востоке Восточно-Европейской платформы в Предуралье (рис.2.1). Возвышенность представляет собой плосковершинную эрозионно-денудационную возвышенность с сильно расчлененным рельефом.

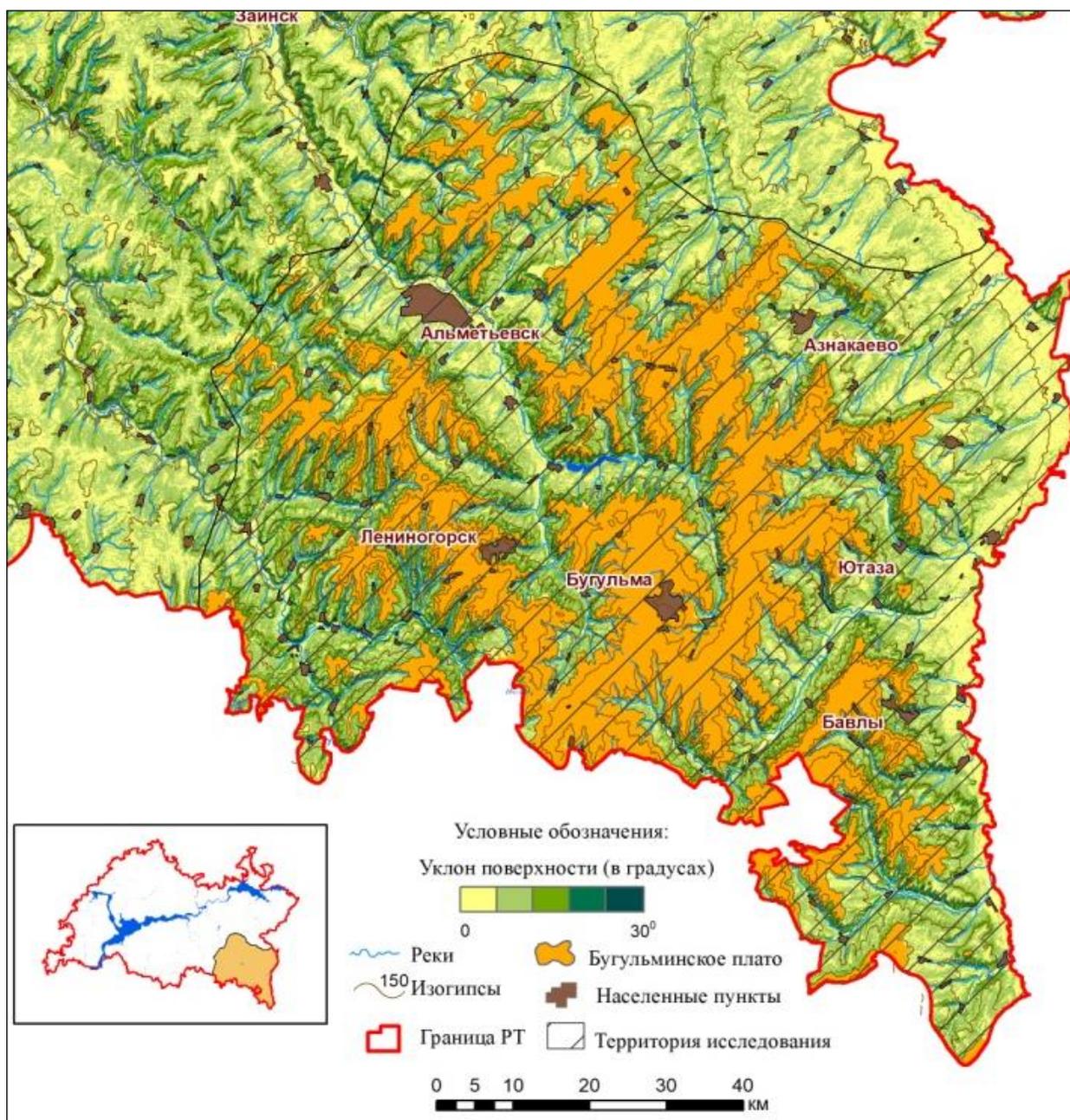
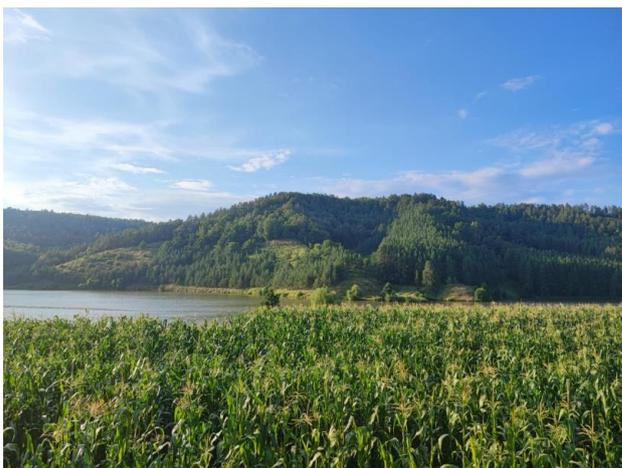


Рис.2.1. Геоморфологическая карта территории Бугульминского плато

Границу Бугульминского плато можно провести по гипсометрическим отметкам 260-382 м, между которыми располагаются удлиненные гряды понижений. Как положительная структура плато сформировалось в результате двух разнонаправленных процессов – неотектонических воздыманий территории и эрозионно-денудационной деятельности временных и постоянных водных потоков. Таким образом, Бугульминское плато – это останец, возникший в результате избирательного разрушения коренных пород пермского возраста [66].

Геолого-геоморфологические условия

Возвышенность характеризуется максимальными высотными отметками 260-382м, имеет сильно расчлененный рельеф. Холмы, возвышающиеся над рельефом, являются останцами древних денудационных поверхностей, разделенных уступами, переходящих в пологие речные долины (рис 2.2). Их возникновение связывают с верхнеплиоценовым этапом опускания и выравнивания рельефа Русской платформы [19]. Наиболее крупные массивы высокого плато развиты на водоразделах левых притоков реки Ик (Кандыз, Дымка, Ютаза, Стерля) и небольших правых притоков рек Зай, Степной Зай (Ямашка, Урсала, Лесной Зай и др.), на водоразделах рек Степной Зай-Лесная Шешма, Кувак, Кичуй. Высокое плато от крупных магистральных долин региона (Ик, Зай, Шешма) удалено на 5-7 км, иногда 15-20 км. В плане высокое плато развито в виде узких (0,5-1,0 км, иногда до 2,0 км) извилистых полос. Все речные долины характеризуются ассиметричным или каньонообразным строением,



Азнакаевский район



Бугульминский район

Рис.2.2 Ландшафт Бугульминской возвышенности

выраженным в неравномерных уклонах и неоднородном террасировании их бортов.

Перепад гипсометрических отметок в пределах Бугульминского плато составляет от 382 м на вершинах водоразделов до 110 м – в пределах речных долин. Ложе крупных рек Шешма, Степной Зай, Ик, Дымка чаще врезано в пермские породы. Склоны водоразделов осложнены обрывами, уступами, часто проявляются вертикальные борозды и рытвины. Углы наклона склонов находятся в пределах от 10 до 30°. На крутых склонах наблюдаются выходы карбонатных пород казанского и уржумского яруса Биармийского отдела пермской системы. Преобладание карбонатных пород, бронирующих плоские вершины эрозионно-денудационных останцев, способствовало активному протеканию на территории Бугульминского плато карстовых процессов [66]. В геологическом отношении территория Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности сложена преимущественно мелководно-морскими отложениями казанского яруса и континентальными отложениями уржумского яруса Биармийского отдела пермской системы. Породы уржумского возраста в большинстве своем смыты с поверхности эрозионно-денудационных останцев возвышенности, обнажая известняки, доломиты и песчаники казанского яруса.

Территория юго-востока Татарстана относится к внеледниковой области Нижнего Прикамья, поэтому здесь четвертичные отложения представлены только континентальными образованиями внеледникового ряда. Среди четвертичных образований выделяются аллювиальные отложения, имеющие широкий возрастной и литологический диапазон и наибольшие мощности, отложения склонового ряда, маломощные элювиально-делювиальные, элювиальные отложения водоразделов. Значительно меньшее площадное распространение имеют эоловые и болотные (органогенные) отложения. Максимальные мощности четвертичных образований в долинах рек достигают 75,0 м, на склонах 21,5 м и на водоразделах до 7,8 м. Диапазон абсолютных высот залегания четвертичных отложений от 8 до 376 м. Геологическая карта и карта четвертичных отложений представлена на рисунках 2.3 и 2.4.

По геолого-геоморфологической обстановке, были выделены обобщенные типы геологической среды:

Аккумулятивная пойма. Современные аллювиальные образования слагают поймы и русла всех рек района (абс. отм. 40 – 70 м). Основными крупными реками являются река 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.

Эрозионно-аккумулятивные террасы рек. Террасы рек сложены аллювиальными отложениями, располагающиеся на низких террасах рек (первая и вторая). Террасы аккумулятивные, подошва аллювия в долинах крупных и средних рек находится на 5,0 – 13 м ниже меженных урезом рек, а кровля возвышается над ними на 8,0 – 12 м.

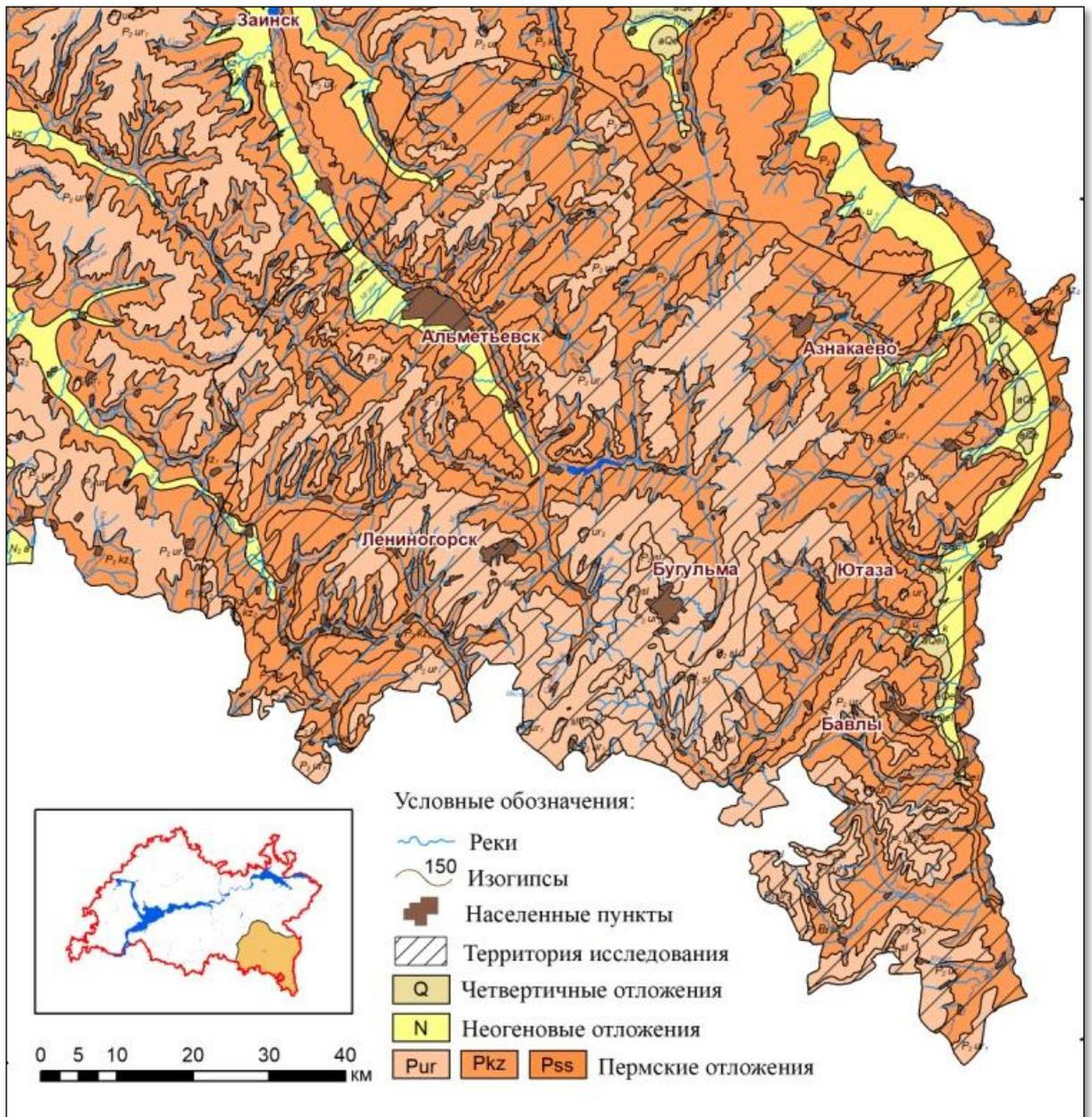


Рис. 2.3 Геологическая карта территории Бугульминского плато

Мощность аллювия в долинах крупных рек достигает 14 – 22 м, малых и средних 9,0 – 18 м. Подстилающие породы — частично отложения неогена и отложения уфимского яруса и казанского яруса.

Эрозионно-аккумулятивные нижние части склонов. Сложены аллювиально-делювиальными отложениями, располагающиеся на высоких террасах крупных рек (третья и четвертая- нерасчлененные) 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. Поверхность нижней части склонов сложена маломощной толщей аллювиально-делювиальных отложений до 1,5 м.

Эрозионная поверхность 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. Состав и строение отложений зависит от строения склона, его крутизны и высоты, но, как правило, это блоки, глыбы и обломки коренных пород, смятые, перемещенные вниз, перемешанные со щебнисто-суглинистым материалом четвертичного возраста. Мощность таких образований чаще всего составляет 3,0–5,0 м, иногда может увеличиваться до 10–15 м. Вверх по склону мощность их сокращается до 2,0–3,0 м. Подстилающие породы — преимущественно казанского яруса.

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 220 м. Состав элювиально-делювиальных образований в значительной мере определяется свойствами подстилающих пород - преимущественно казанского яруса. Мощность элювиально-делювиальных образований в целом примерно в 2 раза выше, чем элювиальных и колеблется до 7,0–9,5 м.

Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов. Водоразделы 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. 280–370 м. Наибольшая мощность элювиальных отложений расположена на низких водоразделах (нижнее плато) 220 – 280 м. с мощностью от 0,5 до 10 м. Подстилающие породы — преимущественно казанского яруса и частично на высоких водоразделах уржумского яруса. В зависимости от состава подстилающих пород выделяются терригенный, карбонатный или терригенно-карбонатный элювий. Мощность элювиальных образований до 10 м.

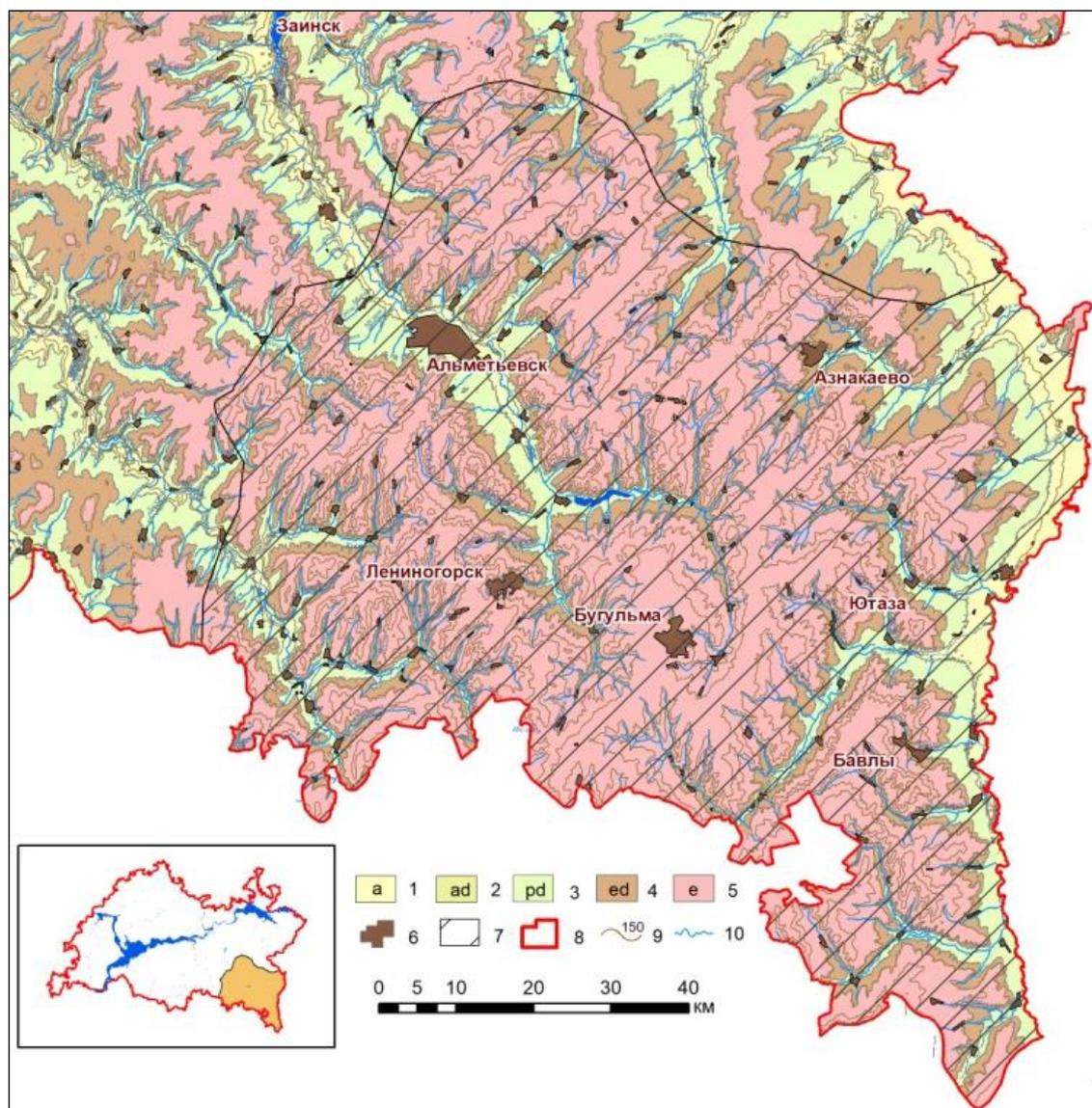


Рис. 2.4 Карта четвертичных отложений территории Бугульминского плато

Неотектоника

Бугульминское плато находится в северо-западной части Бугульминско-Белебеевской возвышенности и приурочено к Южному куполу Татарского свода кристаллического фундамента [72]. В целом это гетерогенная структура с устойчивой тенденцией к поднятию, начиная с миоцена. Суммарная амплитуда восходящих

движений на неоген–четвертичное время около 160–250 м. [38] Это подтверждается характером распределения мощностей неогеновых и четвертичных образований [38], генезисом и возрастом денудационных и аккумулятивных поверхностей [38], и их деформацией, значительными эрозионными врезами и выраженностью палеозойских тектонических структур в рельефе в виде [38] разномасштабных поднятий. Неотектонические движения наложились на более древний структурный план территории и в основных чертах унаследовали его.

Неотектонические движения на территории выражены в рельефе в виде главных форм – водоразделов, возвышенностей, депрессий, что послужило основой для выделения новейших тектонических структур разного ранга [38]. На неотектоническом этапе преобладали поднятия, движения носили блоковый характер, плиоценовая гидросеть закладывалась в депрессионных зонах в тесной зависимости от расположения структур в осадочном чехле и зон повышенной трещиноватости, по которым возможны активные антропогенные изменения природных условий, возникающих под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека [38].

Выположенные вершины водоразделов на протяжении всего четвертичного периода оставались в приповерхностных условиях зоны гипергенеза. Неоднократные смены умеренного и холодного влажного климата и чередующиеся ландшафты способствовали развитию здесь процессов континентального литогенеза гумидного типа по Н.М. Страхову [122]. Длительность периода воздействия агентов выветривания на карбонатные массивы Бугульминского плато привело к формированию на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев элювиальных отложений мощностью 5-10 м. В большинстве своем материнскими породами, по которым развивался элювиальный покров, являлись микрозернистые доломиты казанского яруса.

Геолого-гидрогеологические условия

В гидрогеологическом отношении территория исследований приурочена к Камско-Вятскому артезианскому бассейну, представляющему собой фрагмент Восточно-Русского сложного бассейна пластовых и блоково-пластовых вод [23, 36, 38, 59, 71, 76]. Выделяются следующие геолого-гидрогеологические подразделения, наиболее распространенные на изучаемой территории в верхней части разреза, представляющих интерес в диссертационном исследовании:

Плиоценовый терригенный комплекс

Он представлен различными по составу и условиям залегания озерными и озерно-аллювиальными в различной степени обводненными образованиями киммерийского и акчагыльского ярусов [60]. На склонах водоразделов он залегает первым от поверхности под маломощным (до 0,5-2,0 м) чехлом элювиально-делювиальных образований, а в долинах рек контактирует с аллювиальными четвертичными отложениями и вскрывается скважинами на глубине до 23,4 м [60]. Абсолютные отметки кровли комплекса, отражая своеобразные условия его залегания, изменяются от 200,0 м до 32,2 м. Воды комплекса в основном напорные, пластово-поровые. Величина напора над кровлей комплекса изменяется от 0,3 м до 23,1 м, а над кровлей водовмещающих пород достигает 92,1–103,9 м. Воды комплекса в преимущественно гидрокарбонатные магниевые-кальциевые или кальциево-магниевые, с минерализацией 0,3-0,5 г/л. [60]. Мощность водовмещающих прослоев изменяется от 0,8 м до 6,0 м и редко достигает 22,6 м.

Уржумский терригенный комплекс

Отложения комплекса развиты довольно широко, занимая водораздельные пространства в пределах Бугульминской возвышенности. Грунты представлены глинами, алевролитами, песчаниками, известняками, мергелями. С инженерной точки зрения комплекс представляет собой сложнопостроенную толщу грунтов неоднородных по составу, строению, с изменчивыми параметрами. В приповерхностных горизонтах грунты комплекса в значительной степени выветрелые и приобретают свойства элювиальных грунтов.

Уровень подземных вод устанавливается на глубине до 61,5 м. Пьезометрическая поверхность формируется под влиянием местной гидрографической сети, к которой и направлен поток подземных вод. Абсолютные отметки пьезометрического уровня изменяются от 195,0 м на водоразделах до 77,5 м к долинам рек [92]. В верхней части разреза воды преимущественно безнапорные, слабонапорные, минерализация изменяется от 0,2 до 0,5 г/дм³, воды преимущественно гидрокарбонатно-кальциевые. Мощность горизонта на водоразделах 47,6-150,0 м, к границе выклинивания сокращается до 25,2-9,6 м.

Казанский карбонатно-терригенный комплекс

Отложения комплекса слагают низкие водоразделы и верхние части склонов высоких водоразделов, где перекрываются породами уржумского терригенного комплекса. На дневную поверхность выходят в долинах практически всех рек. Максимальная мощность казанского комплекса 280 м. Преобладающими грунтами комплекса являются глины, песчаники, алевролиты, доломиты, известняки. В приповерхностной части все грунты затронуты процессами выветривания и приобретают свойства элювиальных грунтов.

Глубина залегания казанского водоносного горизонта 14-90 м. Воды напорные. Тип воды гидрокарбонатный кальциево-магниевый, часто при смешении воды сульфатные, минерализация от 0,2 до 2,5 г/дм³. Подземные воды приурочены к трещиноватым разностям известняков, мергелей мощностью от 2,4 до 8,1 м, а также песчаникам на глинистом и известковисто-глинистом цементе, мощностью от 2,3 до 4,2 м и слабосцементированным или трещиноватым алевролитам. Общая мощность водовмещающих пород в основном не превышает 19,9 м. Подземные воды комплекса безнапорные или субнапорные. Напор над кровлей комплекса составляет 0-12 м.

На полях распространения верхнеказанского комплекса развиты карстовые процессы. Карстующимися породами являются гипсоносные известняки и доломиты. Древние карстовые формы к настоящему времени в значительной степени сnivelированы. Более молодые еще сохраняют шахтообразную форму. Глубины провалов от нескольких метров до 10-15 м, диаметр 5-40 м. Особенности литологического состава грунтов нижеказанского комплекса налагают свой отпечаток и на проявляющиеся физико-геологические процессы. Из них наибольшим распространением пользуются овраги, характеризующиеся значительной протяженностью, и оползни, связанные с терригенными отложениями. Основными причинами возникновения оползней является эрозионная деятельность рек, а также наличие выклинивающихся водоносных горизонтов.

На пологих склонах развиты поверхностные грунтовые воды, можно сказать, что преимущественно верховье денудационной возвышенности находится в зоне аэрации. Водоносные горизонты и комплексы приурочены к зоне активного водообмена и их питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и паводковых вод, в пределах водоразделов - путем перетоков из вышележащих

комплексов в нижележащие, а в долинах рек - за счет восходящих подтоков из нижележащих подразделений [83].

Уфимский карбонатно-терригенный комплекс

Данный комплекс объединяет преимущественно карбонатно-терригенные породы уфимского яруса мощностью до 181 м. Узкой полосой они протягиваются по правому берегу реки Ик, по правобережьям рек Зая, Шешма, Мензели у их истоков. Из всех имеющих инженерно-геологическое значение стратиграфо-генетических комплексов уфимский имеет наименьшее площадное распространение. Среди литологических типов грунтов господствующее положение занимают глины, песчаники, алевролиты. Подчиненное положение занимают карбонатные породы - мергели, известняки и доломиты. Разрез часто загипсован.

Водовмещающими грунтами являются песчаники и известняки, реже трещиноватые разности алевролитов. Воды напорные, преимущественно гидрокарбонатно-сульфатного типа, с минерализацией 0,3-12,3 г/дм³. Глубина залегания водоносных горизонтов 6,3-146,2 м, мощность 4,9-61,5 м. Подземные воды обладают сульфатной агрессивностью по отношению к бетонам.

Из физико-геологических процессов, связанных с грунтами уфимского комплекса, необходимо отметить проявление мелкомасштабных оползневых процессов.

Климат

Климат района умеренно континентальный. Среднегодовая температура воздуха +3,6°C, среднемесячные температуры в январе -13,7°C, (минимальные -41°C), в июле +19,6°C (максимальные +38°C). Устойчивый снежный покров, мощностью до 0,65 м, устанавливается в конце ноября и держится 135-155 дней. Среднегодовое количество осадков 525 мм, в вегетативный период 493 мм. Преобладают юго-западные ветры. Образование устойчивого снежного покрова наблюдается во второй декаде ноября. Продолжительность периода со снежным покровом достигает 155-165 дней, при его высоте 40-42 см. Максимальная глубина общего промерзания грунта составляет 2,5 м [76].

В современных условиях физическое выветривание на Бугульминско-Белебеевской возвышенности по исследованиям В.И. Мозжерина [84] обусловлено промерзанием грунта, включающее морозную дезинтеграцию под воздействием

кристаллов и агрегатов льда и криогид-ротационную дезинтеграцию под действием тонких пленок воды. Конечным продуктом этих процессов является пылеватый материал. Поэтому возрастной диапазон образования элювия по коренным породам устанавливается от раннего неоплейстоцена до голоцена включительно.

Тектоника территории, геоморфологические условия, гипсометрическое положение пород относительно базиса эрозии, минеральный состав, структурно-текстурные особенности горных пород, их степень трещиноватости, гидрогеологические условия, климат создали благоприятные условия для проникновения агентов выветривания и образования элювиальных грунтов на изучаемой территории, а также развития не благоприятных экзогенных процессов, таких как суффозия и карст.

2.2 Опасные инженерно-геологические процессы

На рассматриваемой территории получили развитие эрозионные, карстово-суффозионные процессы, подтопление и затопление.

Овражная эрозия. Наибольшее развитие получила в пределах эрозионных поверхностей средней части склонов и на эрозионно-денудационных поверхности приводораздельных частей склонов. Густота овражной эрозии находится в пределах 1–2 пог. км/км². Овраги прямолинейные, достигают длины до 5 км при ширине 0,3 км, поперечный профиль преимущественно асимметричный. Для древовидных оврагов характерна симметричная форма поперечного профиля, широкое днище до 100 м и задернованные борта высотой до 20 м. Овраги имеют отвесные, почти не задернованные склоны, осложненные обвалами, оплывинами [133].

Оползневые процессы относятся к категории опасных экзогенных процессов, развиты по четвертичным, неогеновым и пермским породам. Блоковые смещения наблюдаются на склонах с уклонами бортов 20–40°, имеют в плане циркообразную форму, со ступенчатой поверхностью, иногда встречаются крупнобугристые формы. Деформируемыми породами являются карбонатно-терригенные.

Подтопление и затопление наибольшее развитие получили в пределах крупных рек: река Ик (притоки Кандыз, Дымка, Ютаза, Стерля и др), река Зай, Степной Зай (притоки Ямашка, Урсала, Лесной Зай и др.), река Шешма, (Лесная Шешма, Богряжка и др.) преимущественно во время паводков и паводков.

Наибольший интерес в научном исследовании отводится *суффозионным и карстово-суффозионным процессам*, так как проявление данных процессов на территории приводит к появлению поверхностных и подземных эрозионных форм - проседанию вышележащей толщи и образованию западин - суффозионных воронок, блюдц, впадин, а также карстово-суффозионных форм – провальных воронок, полостей. Это создает серьезные проблемы при проектировании оснований зданий и сооружений

Изученность карстово-суффозионных процессов на исследуемой территории довольно низкая. В 60-х годах изучению карста в Среднем Поволжье посвящены региональные работы А.В. Ступишина (1961 г.) [125], Б.В. Сементовского [113], М.С. Кавеева (1961,1963 гг.) [49-51] и С.Г. Каштанова (1961 г.) [58, 109]. Авторами этих работ отмечается, что основные районы развития карста связаны с зонами поднятий (на данной территории – это зона Сокско-Шешминская зона поднятий) и обусловлены карстованием сакмарско-артинских карбонатно-сульфатных пород и карбонатных образований верхней перми. Развитие карстовых процессов определяется приподнятым положением верхнепалеозойских отложений относительно местных базисов эрозии и благоприятными условиями для циркуляции подземных вод. А.В. Ступишиным [125] условия характеризуются как погребенный карст, Им также проведено районирование территории Среднего Поволжья по проявлениям современного карста с составлением мелкомасштабной обзорной карты. М.С. Кавеевым [49-51] описывается динамика образования провалов, даются рекомендации по методике изучения карста [36]. В 1913 году М.Э. Ноинский [90] выяснил природу образования здесь поверхностных карстовых провалов, которые возникли в связи с выщелачиванием гипсовой залежи кунгурского яруса нижней перми. Серьезные исследования отражены в работах, Б.В. Васильева (1966 г.) [14], Н.П. Торсуева (1976 – 1986 г.) [129], Е.Д. Кожеватова (1980 – 1985 г.) [59], А.Г. Мусина (1966 г.) [87], Р.Ф. Абдрахманова (1981 г.) [1], В.А. Елкина (2002 г.) [45-46], А.В. Аникеева (2011 г.) [4], С.А. Чумаченко (2011 г.) [140], П.В. Вишневого, Ю.Б. Антонова, Г.Е. Кузнецова, М.Я. Боровской (1966 г.) [15], В.П. Петрова (1997 г.) [98] однако, несмотря на глубину исследований, работы посвящены преимущественно оценке карстовой опасности, мало затрагивая суффозионные процессы. Карстово-суффозионные процессы в Республике Татарстан в основном наблюдались в процессе

инженерно-геологических обследований при проведении геологосъемочных и геоэкологических работ, проводившихся в 1995-2000 гг., а также в процессе исследований на востоке РТ ИГЭ РАН (г. Москва) в 2005-2006 гг. Стационарные наблюдения за развитием карстово-суффозионных процессов не проводились на изучаемой территории. Вместе с тем наблюдения показывают, что в рельефе исследуемой территории преобладают именно суффозионные формы.

На первом этапе исследований для оценки был выполнен анализ имеющихся картографических материалов территории. К ним относились космоснимки различных лет, аэрофотоснимки, топографические планы, материалы инженерных изысканий. Учитывая размеры исследуемой области, первичный поиск суффозионных форм рельефа производился с использованием программного комплекса SASPlanet, позволяющим достаточно уверенно устанавливать суффозионные деформации диаметром 3 м и более. В результате была составлена карта распространения суффозионных и карстово-суффозионных воронок на территории Бугульминского плато, представленная на рисунке 2.5.

Полевое обследование показало, что общее количество зафиксированных суффозионных и карстово-суффозионных воронок составляет 1151 штук, средний диаметр воронок равен 6,5 м, средний максимальный диаметр 40 м. Это говорит о том, что при проектировании зданий и сооружений необходим учет возможного развития суффозионных и карстово-суффозионных процессов. В настоящее время в инженерной геологии отсутствует единый методологический подход к количественной оценке суффозионной и карстово-суффозионной опасности территорий, что связано как с различиями в объяснениях различными

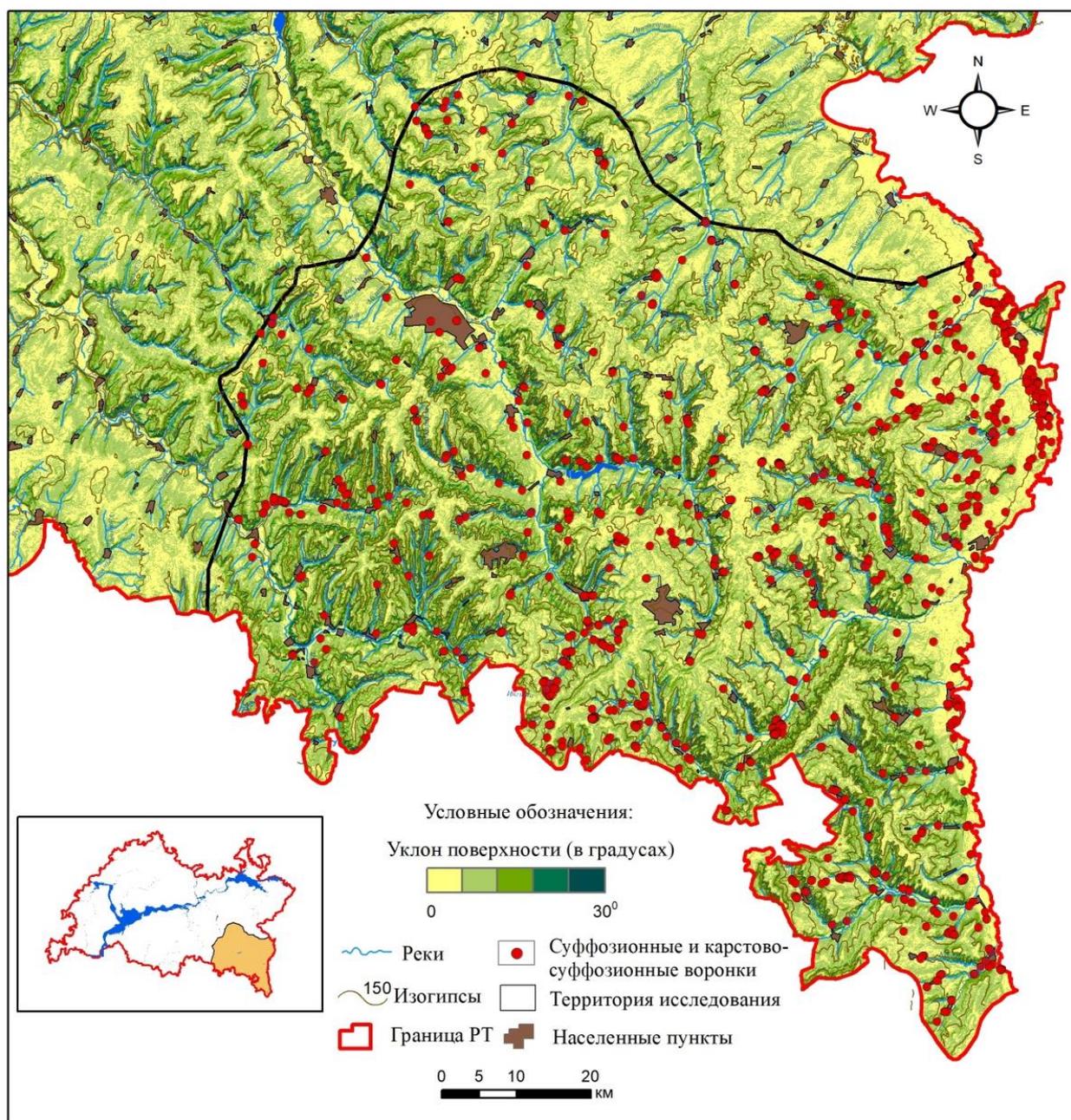


Рис. 2.5. Карта распространения карстово-суффозионных воронок на территории Бугульминского плато

исследователями механизма протекания суффозионного процесса, так и в оценке потенциальных последствий для объектов строительства. За основу нами был принята методика Рагозина А.Л. [8], которая послужила базой существующих нормативных документов в Российской Федерации в сфере оценки пораженности территорий карстово-суффозионными процессами.

Плотность воронок рассчитывалась по формуле:

$$K_N = \frac{N}{S}, \quad (2.1)$$

где N – количество поверхностных карстовых форм, S – площадь участка.

Пораженность территории провалами:

$$K_s = \frac{\sum s}{S}, \quad (2.2)$$

где $\sum s$ – суммарная площадь воронок [8]. Результаты расчетного метода сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Оценка суффозионной и карстово-суффозионной пораженности территории Бугульминского плато

Морфогенетические группы рельефа	Площадь км ²	N (1151 шт)	K _N , т/км ²	K _s , м ² /км ²
Водоразделы	4283,8	418	0,1	0,58
Приводораздельные части склонов	1749,8	102	0,06	0,34
Средние части склонов	1124,2	124	0,11	0,66
Нижние части склонов	1250	137	0,1	0,65
Террасы рек	1668,5	370	0,22	1,3

На основании объединенных данных полевых и выполненных расчетов был проведен анализ суффозионной и карстово-суффозионной опасности территории Бугульминского плато:

Аккумулятивная пойма.

Карстово-суффозионные процессы не развиты в данном типе рельефа и отсутствуют элювиальные карбонатные породы.

Эрозионно-аккумулятивные террасы рек.

Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст (рис 2.6). Количество воронок 370 шт. Распределение провалов на террасах рек неравномерное. Воронки здесь имеют преимущественно конический или провальный профиль (d=15,0–35 м), местами образуют линейно-вытянутые цепочки воронок. 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 ($d=50–120$ м) приурочены к озерам. Уклон поверхности составляет $1-3^\circ$. Средняя плотность воронок составляет $0,22$ шт/км².



А)



Б)

Рис. 2.6. Карстово-суффозионные воронки на эрозионно-аккумулятивных террасах рек: А) Карстово-суффозионная воронка вдоль речной долины р. Шешма Лениногорский район; Б) Карстово-суффозионная воронка вдоль речной долины р. Ик Ютазинский район

Пораженность территории провалами – $1,3$ м²/км². На территории отсутствуют элювиальные карбонатные породы, в результате переуглубление долин и смыва отложений. Территория по карстово-суффозионной опасности относится к умеренно опасной.

Эрозионные поверхности нижней части склонов.

Для этого типа рельефа характерны карстово-суффозионные процессы (рис. 2.7). Распределение провалов на территории неравномерное. Карстовые формы расположены чаще в склоновой части долин рек. Оседания имеют форму блюдец или воронок ($d=3,0–15,0$ м), реже можно встретить провальные воронки ($d=20,0–25,0$ м). Уклон поверхности составляет $3-6^\circ$. Дно воронок чаще сухое, реже заболочено или приурочены к небольшим озерам. Плотность воронок – $0,1$ шт/км². Пораженность территории провалами – $0,65$ м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной. Наибольшая суффозионная и карстово-суффозионная опасность развита вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка.



А)



Б)

Рисунок 2.7. Карстово-суффозионные воронки на эрозионно-аккумулятивных нижних частях склонов: А) Карстово-суффозионная воронка в склоновой части п. Калейкино Альметьевский район; Б) Карстово-суффозионная воронка п. Верхний Акташ Альметьевский район

Эрозионные поверхности средней части склонов

Для этого типа рельефа характерны суффозионные и карстово-суффозионные процессы (рис. 2.8) Количество воронок– 124 шт.



А)



Б)

Рис.2.8. Карстово-суффозионные воронки на эрозионных поверхностях средней части склонов: А) Суффозионная воронка п.Бакалы Бавлинский район; Б) Карстово-суффозионная воронка п.Нижняя Мактама Альметьевский район

Распределение провалов на территории неравномерное, воронки преимущественно имеют конусообразную форму ($d=1,5-10,0$ м). Дно воронок чаще сухое. Уклон поверхности составляет $6-10^\circ$. Плотность воронок – $0,11$ шт/км².

Пораженность территории провалами – 0,66 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной.

Эрозионно-денудационные поверхности
приводораздельных частей склонов.

Для этого типа рельефа характерны преимущественно суффозионные и реже карстово-суффозионные процессы (рис 2.9).



А)



Б)

Рис.2.9. Карстово-суффозионные воронки на эрозионно-денудационных поверхностях приводораздельных частей склонов: А) Суффозионная воронка п. Кудашево Бугульминский район; Б) Суффозионная воронка п. Райлан Бугульминский район

Плотность воронок – 0,06 шт/км². Пораженность территории провалами – 0,65 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к незначительно опасной. Количество воронок – 102 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму (d=1,3–10,0 м). Дно воронок чаще сухое. Уклон поверхности составляет 10-28°.

Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов.

Для этого типа рельефа характерно активное протекание суффозионных процессов (рис 2.10). Количество воронок – 418 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму (d=0,3–8,0 м). Дно воронок чаще сухое. Уклон поверхности составляет 0-3°. Плотность воронок – 0,1 шт/км². Пораженность

территории провалами $0,58 \text{ м}^2/\text{км}^2$. Территория по карстово-суффозионной опасности относится к мало опасной.



А)



Б)

Рис.2.10. Суффозионные воронки на эрозионно-денудационных поверхностях водоразделов: А) Суффозионная воронка п. Карамалы Азнакаевский район; Б) Суффозионная воронка п. Ютазы Ютазинский район

Полученные значения площадной пораженности суффозионными процессами по степени опасности были классифицированы по методике [2]. Анализ показывает, что по интенсивности провалобразования территория Бугульминского плато преимущественно относится к умеренно опасной территории ($1-10 \text{ м}^2/\text{км}^2\cdot\text{год}$). Наибольшая интенсивность провалобразования ($10-100 \text{ м}^2/\text{км}^2\cdot\text{год}$) наблюдается у речных долин и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай. Данные участки можно отнести к умеренно-опасным.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Бугульминское плато представляет собой плосковершинную эрозионно-денудационную возвышенность с сильно расчлененным рельефом, образовавшиеся в результате избирательного разрушения коренных пород пермского возраста. Главными условиями создания эрозионно-денудационного рельефа стали: тектонические, геологические, гидрогеологические, геоморфологические условия и климат.

2. На рассматриваемой территории опасными инженерно-геологическими процессами являются суффозионные и карстово-суффозионные. Полевое обследование показало, что общее количество зафиксированных суффозионных и карстово-суффозионных воронок составляет 1151 штук, средний диаметр воронок равен 6,5 м, средний максимальный диаметр 40 м.

3. По результатам количественной оценки площадной пораженности суффозионными и карстово-суффозионными процессами территория Бугульминского плато относится к умеренно опасным территориям ($1-10 \text{ м}^2/\text{км}^2\cdot\text{год}$). Наибольшая интенсивность провалобразования ($10-100 \text{ м}^2/\text{км}^2\cdot\text{год}$) наблюдается на террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай. Данные участки по методике Рагозина А.Л. [8] можно отнести к умеренно-опасным.

4. Несмотря на высокую антропогенную нагрузку и высокую степень пораженности суффозионными и карстово-суффозионными формами рельефа на настоящий момент территория является плохо изученной. Карстово-суффозионные процессы в республике в основном изучались в процессе инженерно-геологических обследований при проведении геологосъемочных и геоэкологических работ, проводившихся в 1995-2000 гг., а также в процессе исследований на востоке РТ ИГЭ РАН (г. Москва) в 2005-2006 гг. Стационарные наблюдения за развитием карстово-суффозионных процессов на изучаемой территории не проводились.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

3.1 Факторы формирования элювиальных грунтов

Бугульминское плато на территории Татарстана представляет собой одну из вершин Бугульминско-Белебеевской возвышенности, осложняющих поверхность Южно-Татарского свода (ЮТС). Начиная с неогена территория испытывала поднятия, в результате чего на поверхности обнажились карбонатно-терригенные отложения казанского яруса. Различная интенсивность воздыманий блоков кристаллического фундамента в основании ЮТС обусловила формирование полого-холмистого рельефа с обособлениями выравненных вершин водоразделов с террасированными склонами, отделенных друг от друга небольшими речными долинами. Выположенные вершины водоразделов на протяжении всего четвертичного периода оставались в приповерхностных условиях зоны гипергенеза. Неоднократные смены умеренного и холодного влажного климата и чередующиеся ландшафты способствовали развитию здесь процессов континентального литогенеза гумидного типа по Н.М. Страхову (1960 г.) [122].

Гипергенные изменения обусловлены главным образом процессами физического выветривания. На протяжении этапов похолоданий в период развития валдайского оледенения морозное выветривание было достаточно интенсивным, что сформировало относительно мощную зону дезинтеграции по карбонатным породам и также достаточно интенсивно проявлялись процессы перемещения пород в результате водно-денудационных процессов. В этапы потеплений физическое выветривание ослаблялось, а процессы химического выветривания проявлялись в виде незначительного растворения доломитов и отложения корочек натечного кальцита в основании слоя структурного элювия. Тем самым строение карбонатного профиля элювия характеризует условия холодного маловлажного климата, когда основным фактором преобразования пород являлись систематические циклы промерзания-оттаивания. Длительность периода воздействия агентов выветривания привело к формированию на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев элювиальных отложений мощностью 5-10 м. (рис. 3.1).



А)

Б)

Рис. 3.1 Фото обнажений карбонатных пород на территории Бугульминского плато: А) Обнажение карбонатных пород у п.Огородниково Бугульминский район Республики Татарстан; Б) Обнажение карбонатных пород у п.Новые Бавлы Бавлинский район Республики Татарстан

В большинстве своем материнскими породами, по которым развивался элювиальный покров, являлись микрозернистые доломиты и известняки казанского и уржумского яруса. Геологические исследования В.Н. Разумова [103], Г.С. Золотарева [48], А.Г. Черняховского [140] о составе и строении покровного элювия позволили установить в разрезе их профиля определенную зональность, характерную для молодых кор выветривания. Наиболее полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами представлен [17-18] на рисунке 3.2 и описан ниже.

В основании зоны гипергенного преобразования пород залегают плотные, светло-серые, массивные карбонатные породы. В стенках карьеров видно, что породы секутся редкими вертикальными трещинами разгрузки. Трещины располагаются 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 (1,5х0,6х0,8 м), то в верхней части – уже мелкоблочными (0,5х0,25х0,3 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. Над ним согласно залегает



Рис. 3.2. Залегание карбонатных пород, фото карьера п. Райлан, Бугульминский район Республики Татарстан

слой плитчатых карбонатных пород. Породы светло-серые, слабо глинистые, характеризуются микрзернистой 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 положении, которое соответствует залеганию первичной карбонатной породы.

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 вымываний в образованные полости и понижения красно-бурого глинистого материала. Мощность слоя бесструктурного элювия составляет 1,5–2,5 м.

Над ним согласно залегает слой плитчатых карбонатных пород, 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.

Таким образом, в разрезе зоны гипергенеза четко обособляются два слоя. Нижний слой представлен структурным элювием, здесь преобладают процессы физического разрушения осадочных пород [18]. По мере увеличения степени трещиноватости карбонатного массива, увеличивается и водопроницаемость известняков и доломитов. Проникающие в массив инфильтрационные воды способствуют избирательному растворению и дальнейшей дезинтеграции пород за счет перепадов температур и влажности [18]. В результате со временем плотные известняки и доломиты рассыпаются до состояния щебня, дресвы и карбонатной муки [18]. Так постепенно формируется слой бесструктурного элювия. В незахороненном состоянии мощность бесструктурно элювия небольшая вследствие постоянных смывов карбонатной муки водами атмосферных осадков. Лишь после того, как элювиальные отложения перекрываются делювиальными суглинками, мощность слоя бесструктурного элювия начинает постепенно увеличиваться [18].

Как видно, выветривание карбонатных пород сводится к физической дезинтеграции в результате сезонно-климатических перепадов температур. Подобный механизм дезинтеграции доломитов, известняков отразился в морфологии поверхностей псефитовых и алевритовых обломков карбонатных пород. Исследование поверхности выветрелых основных пород и заполнителя проводили методом СЭМ на 30 образцах. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе FEI XL-30ESEM. Съемка образцов осуществлялась в режиме высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кэВ. На исследуемые образцы предварительно напылялся проводящий слой углерода С толщиной ~30нм. Элементный анализ выполнен при помощи энергодисперсионного спектрометра EDAX, работающего в комплексе с СЭМ. На исследования были отобраны образцы с карьеров п. Новые Бавлы, п. Потапово-Тумбарла Бавлинского района, п. Наратлы, п. Аверьяново Бугульминского района, п. Сарабикулово, п. Огородниково

Лениногорского района, п. Алабакуль, п. Александровка Ютазинского района, п. Кулшарипово, п. Ново Суркино Альметьевского района. Элементарный анализ проводили на каждом образце по профилю сверху вниз. Пример изучения дезинтеграции карбонатных пород приведен ниже на рисунке 3.3.

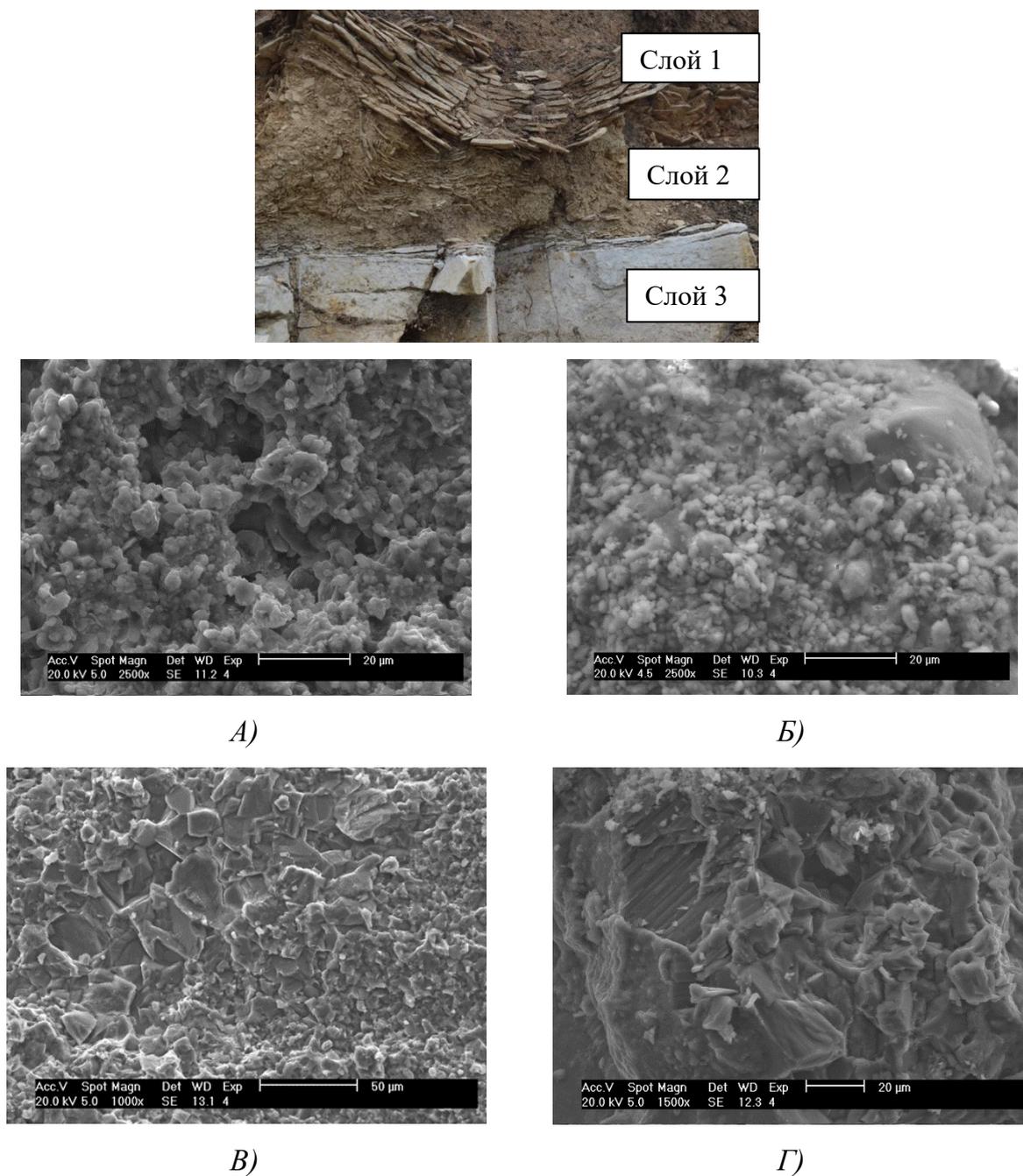


Рис. 3.3 Микроструктура карбонатного профиля в зоне выветривания (карьер п.Новые Бавлы Бугульминского района): А) Слой 1. Бесструктурный горизонт (Плитчатый известняк); Б) Слой 2. Бесструктурный горизонт (Карбонатно-глинистая мука); В) Слой 3. Структурный горизонт (Известняк крепкий); Г) Слой 4. Сохранный массив (Известняк крепкий)

На рисунке 3.3 хорошо прослеживаются изменения в межзерновом пространстве карбонатных пород в результате дезинтеграции. Периферия обломков карбонатной муки сложена зернами доломитов с хорошо проявленными габитусными элементами в виде граней, ребер и углов ромбоэдров. Это возможно только в том случае, когда происходит механический разрыв связей между отдельными минеральными зернами в породе без их растворения. Для подтверждения этого предположения были проведены модельные эксперименты на 100 образцах карбонатных пород (рис.3.4). Из исходных доломитовых и известковистых пород выпиливались пластинки 2,5x2,5 см при толщине 1,0 см. Затем пластинки подвергались циклическим промораживаниям и оттаиваниям согласно ГОСТ Р 70259-2022 [33].

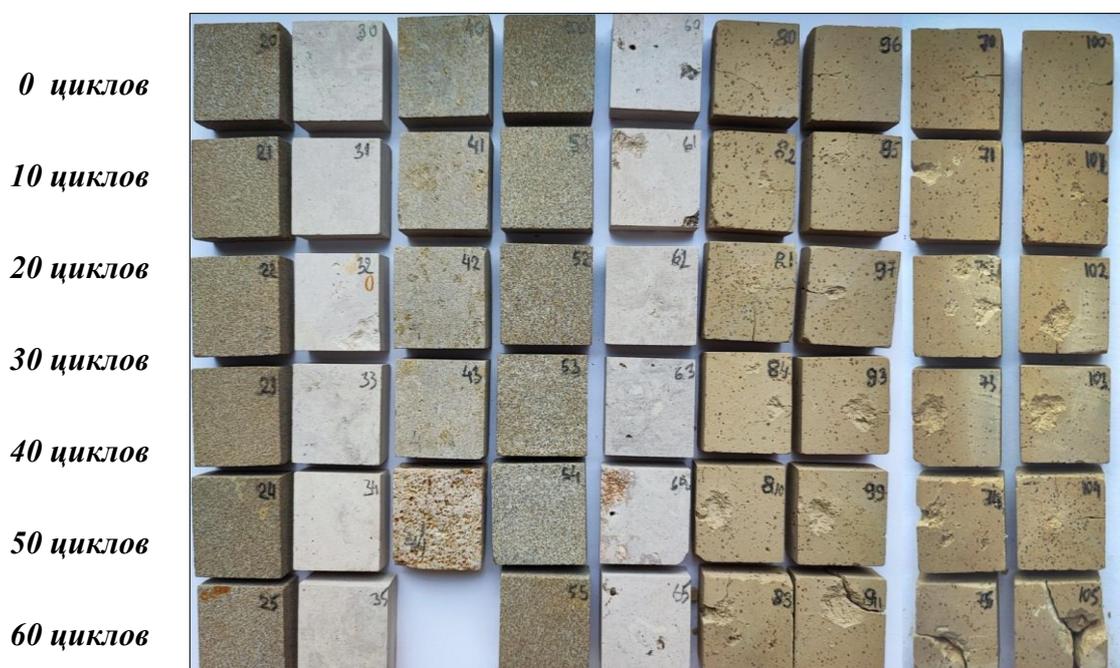


Рис.3.4. Дезинтеграция карбонатных пород под влиянием циклов замораживания-оттаивания

Наиболее быстро этот процесс наблюдается в диапазоне естественных низких температур (промерзание при $-18^{\circ} \pm 2$ и оттаивание $+20 \pm 5^{\circ}\text{C}$) у карбонатных пород, представленных доломитами. После каждых 10 циклов осуществлялся визуальный осмотр образцов. Исследования на прочностные характеристики проводились для первоначально ненарушенной породы, через 10, 30 и 60 циклов для того, чтоб увидеть динамику изменения прочностных характеристик. Было установлено, что через 20 циклов промерзания-оттаивания образцы микрозернистого доломита начали

разваливаться на мелкие части с образованием на поверхности доломитовых зерен с выраженными габитусными элементами. При этом отмечалась тенденция более интенсивного разрушения образцом микрозернистых доломитов с увеличением в их составе глинистой компоненты. В породах, представленных известняками, процесс физической дезинтеграции проходил медленнее, только после 30 циклов замораживания и оттаивания наблюдалось ухудшение физико-механических свойств пород на 10%. Изменение физико-механических свойств доломита и известняка от циклов промерзания-оттаивания представлены на рисунке 3.5.

Как видно, выветривание карбонатных пород сводится к физической дезинтеграции. Основным фактором выветривания являются сезонно-климатические перепады температур [66]. Тонкие водные пленочки, заполняющие трещинки разгрузки и межзерновое пространство известняков и доломитов, оказывают расклинивающее действие на породы. С понижением температур поверхностная энергия незамерзающих поровых вод на границах с твердой минеральной фазой возрастает [66].

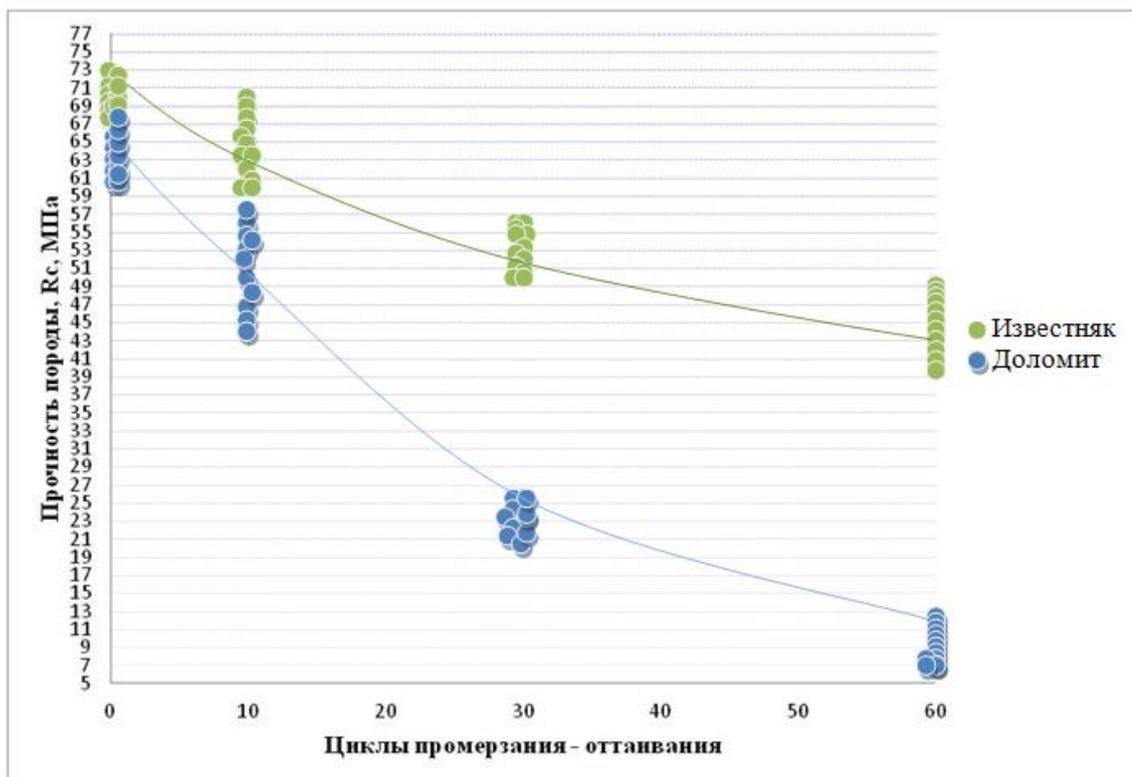


Рис.3.5. График изменения прочности карбонатных пород от циклов промерзания-оттаивания

Создающиеся напряжения разрывают межзерновые структурные связи в породах,

способствуя их механическому разрушению. Процессы химического выветривания отходят на второй план [66].

3.2. Строение профиля молодых кор выветривания

Методика изучения включала в себя описание и фотодокументацию стенок карбонатных карьеров, вскрывающих разрезы зоны гипергенеза. В общей сложности было исследован 201 карбонатный карьер. Карта фактического материала представлена на рисунке 3.6. В ходе рекогносцировочного маршрутного обследования проводилось изучение пород разной степени преобразованности, отмечались особенности сложения и минерального состава, так же проводилось изучение, фотофиксация с занесением координатных точек в программный комплекс SASPlanet.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза [66] (рис.3.7).

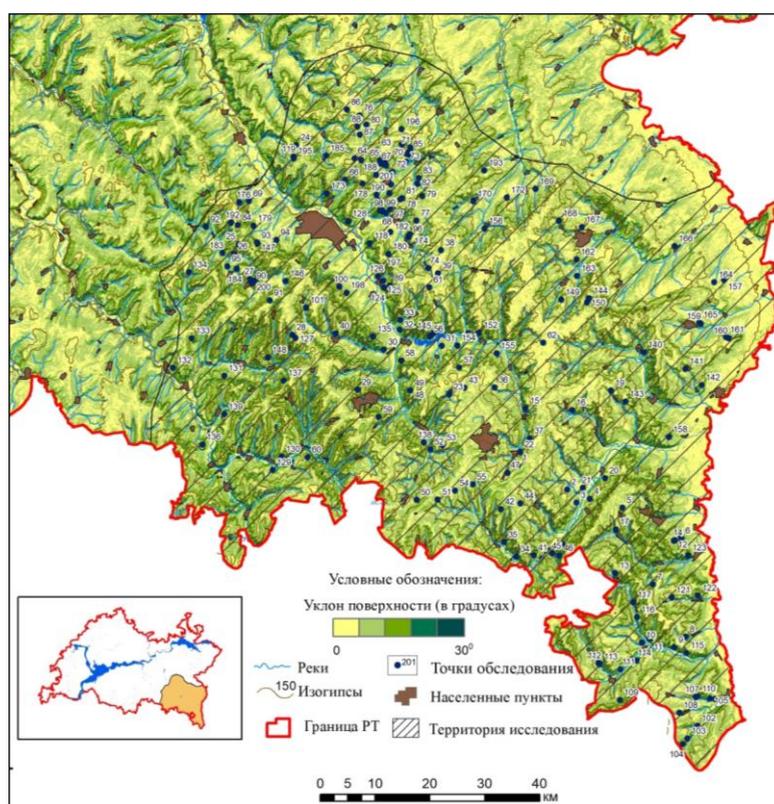
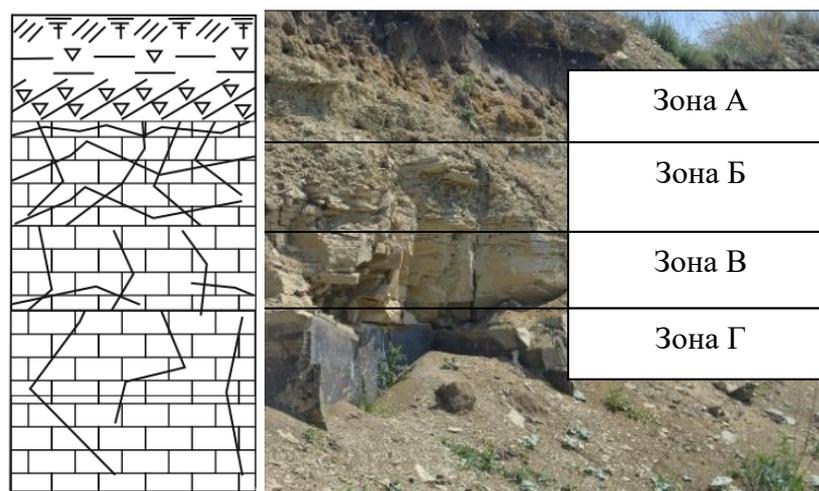


Рис. 3.6 Карта фактического материала



А)

Б)

Рис. 3.7. Схематическая обобщенная схема (А) и фото (Б) профиля залегания карбонатных пород на территории п. Райлан Бугульминский район

В строении молодых кор выветривания хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных карбонатных пород. В соответствие с классификацией грунтовых массивов согласно ГОСТ 25100-2020 [32] выветрелые породы по степени экзогенного изменения подразделяются на следующие зоны [19,66].

БЕССТРУКТУРНЫЙ ЭЛЮВИЙ

ЗОНА А. Зона представлена слоем карбонатной муки, характеризующейся рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой [66]. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. В кровле горизонта карбонатная мука обогащается глинистым материалом, придающим элювиальным грунтам светло-бежевую окраску. Глинистый материал поступает из вышерасположенного почвенно-растительного слоя в период таяния снега и ливневых осадков [66]. В отдельных разрезах стенок карьеров верхняя зона бесструктурного элювия имеет более сложное строение. В его пределах наблюдается переслаивание слоев различной степени преобразования. Слои карбонатной муки могут чередоваться со слоями тонкоплитчатых карбонатных пород,

сцементированных тонкодисперсным карбонатно-глинистым иллювием. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м [66].

ЗОНА Б. Зона сложена разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания [66]. 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. Плиточки карбонатных пород разделены относительно широкими вертикальными и горизонтальными трещинами, заполненными тонкодисперсным карбонатным материалом с включениями дресвы. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м [66].

СТРУКТУРНЫЙ ЭЛЮВИЙ

ЗОНА В. Данная зона представлена известняками и доломитами, разбитыми системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности [66]. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется иллювиальный тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей с блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и средне-плитчатой [66]. Особенностью этих слоев является то, что блоки и плитки отдельностей карбонатных пород, несмотря на разобщенность в массивах, сохраняют залегание, а также структурно-текстурные признаки, присущие исходной, неизменной породе. Мощность слоя варьирует от 0,5 до 3,0 м [66].

СОХРАННЫЙ МАССИВ

ЗОНА Г. В исходном неизменном состоянии известняки и доломиты, слагающие эрозионно-денудационные останцы, представляют собой плотные породы светло-серой окраски с микро-тонкозернистой структурой массивной или неясно-слоистой текстурой за счет наличия глинистых слоев [66]. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности [66]. Протяженные трещинные фильтрационные каналы раскрытостью до 5,0 см обусловили хорошую дренированность верхней части

эрозионно-денудационных останцев, исключая образования здесь застойных водоемов или заболоченных понижений. Таким образом, породы зоны гипергенеза большую часть времени находились в условиях низкой увлажненности, что существенно замедлило интенсивность их выветривания [66].

3.3 Пространственное распространение элювиальных грунтов

Для изучения пространственной оценки распространения элювиальных грунтов по площади, были построены профили карбонатных карьеров и карта мощности распространения элювиальных грунтов.

На территории можно выделить три наиболее распространённых карбонатных профиля, развитых в разной геолого-геоморфологической обстановке.

Наиболее полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами представлен в профиле №1, показанном на рисунке 3.8.

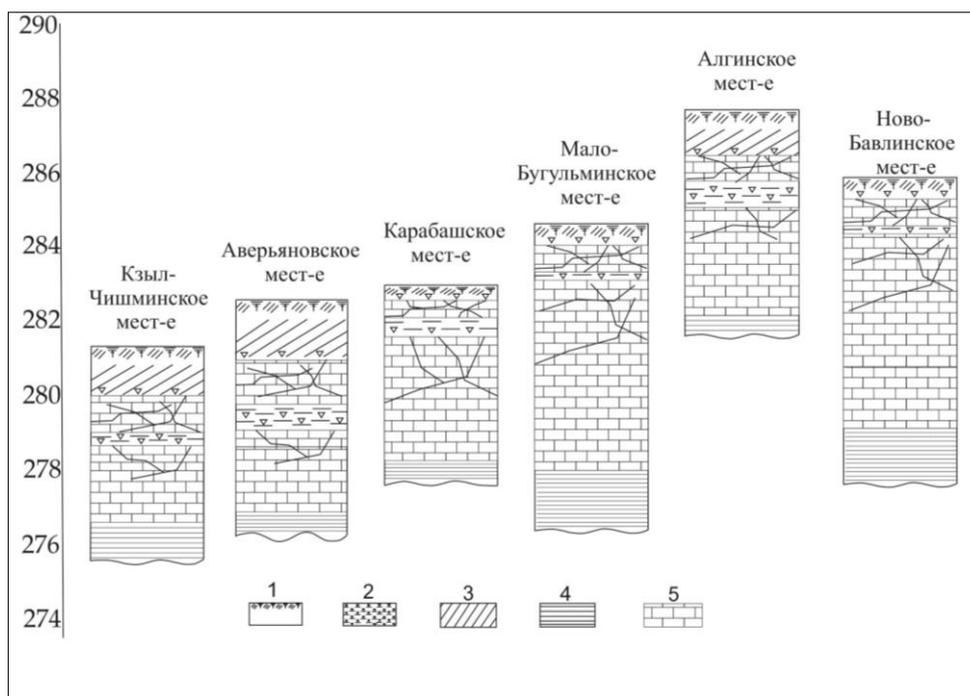


Рис. 3.8. Профиль №1

Описание: 1- почвенно-растительный слой; 2 – карбонатно-глинистая мука с включением дресвы и щебня карбонатных пород; 3 - суглинки темно-серые переходящие в подзолистые почвы; 4- глина; 5 – карбонатные породы.

Данный профиль встречается почти повсеместно на эрозионно-денудационных поверхностях водоразделов и эрозионно-денудационных поверхностях приводораздельных частей склонов междуречья рек Шешма и Степной

Зай, р. Степной Зай и 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. Абсолютные отметки профиля составляют 220,0- 370,0 м.

Профиль №2 развит в пределах средней части склонов эрозионно-денудационных останцев, где развиты коры выветривания сокращенной мощности (рис. 3.9). 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. Абсолютные отметки профиля составляют 160-220 м.

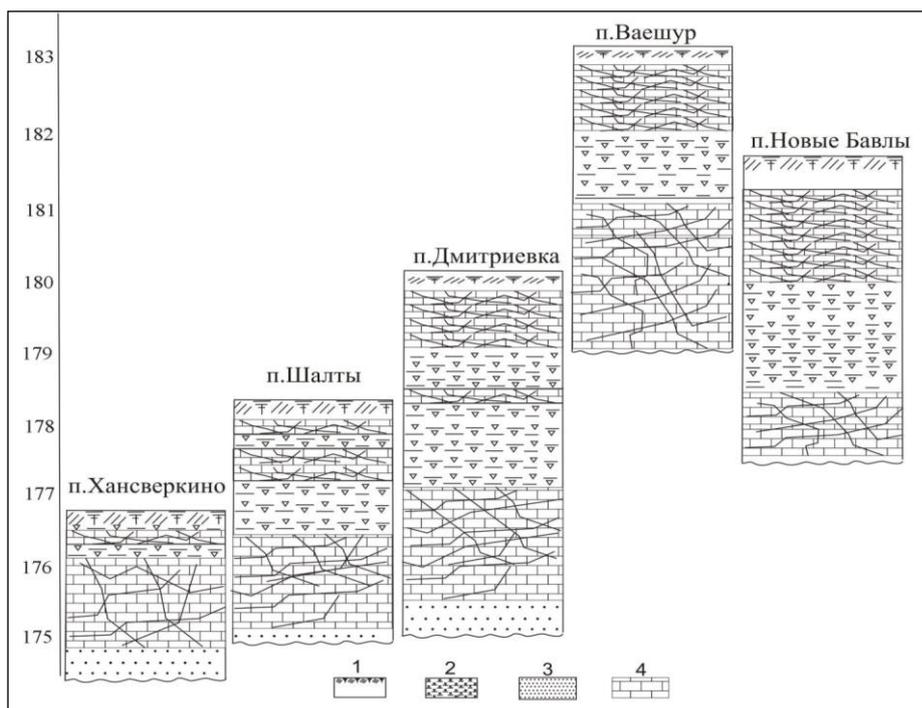


Рис. 3.9. Профиль №2

Описание: 1- почвенно-растительный слой; 2 – карбонатно-глинистая мука с включением дресвы и щебня карбонатных пород; 3– песчаники; 4 – карбонатные породы.

Профиль №3 развит в пределах речных долин эрозионно-аккумулятивных поверхностей нижней части склонов, где развиты наиболее маломощные покровные элювиальные отложения (рис 3.10). 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. Абсолютные отметки профиля составляют 110-160 м.

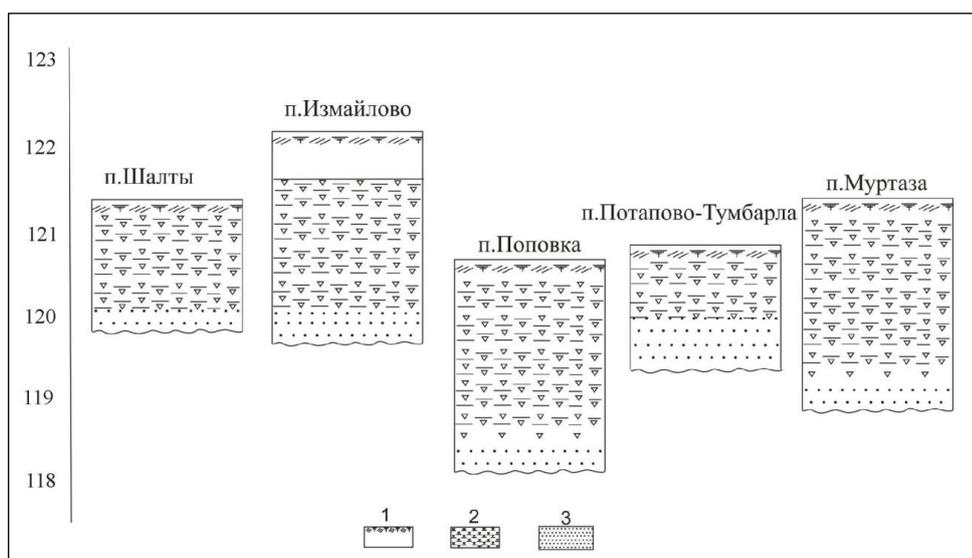


Рис. 3.10. Профиль №3

Описание: 1- почвенно-растительный слой; 2 – карбонатно-глинистая мука с включением дресвы и щебня карбонатных пород; 3- песчаники.

По результатам рекогносцировочного маршрутного обследования впервые была построена карта распространения мощности элювиальных грунтов в программной среде ArcMap 10.8, представленная на рисунке 3.11. В качестве исходных материалов были использованы данные рекогносцировочного обследования. Анализ распространенности мощности элювиальных отложений показал, что в пределах всей территории Бугульминского плато широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Они покрывают практически все выположенные вершины эрозионно-денудационных останцев [20], где можно наблюдать наиболее мощный и полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами структурного и бесструктурного элювия. Общая мощность элювиальных отложений составляет от 4,0 до 6,0 м. [20]. На склонах

останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала [20]. Данные участки 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, чаще элювий захоронен под относительно мощной толщей делювиальных и аллювиальных отложений или практически может отсутствовать [20]. Преимущественно отложения представлен бесструктурным горизонтом с мощностью до 1,5 м.

Таким образом, определенную проблему [20] составляют элювиальные грунты выложенных вершин эрозионно-денудационных останцев, слагающих верхнюю часть карбонатных массивов, поскольку именно они в большинстве случаев находятся во взаимодействии с инженерными сооружениями [20].

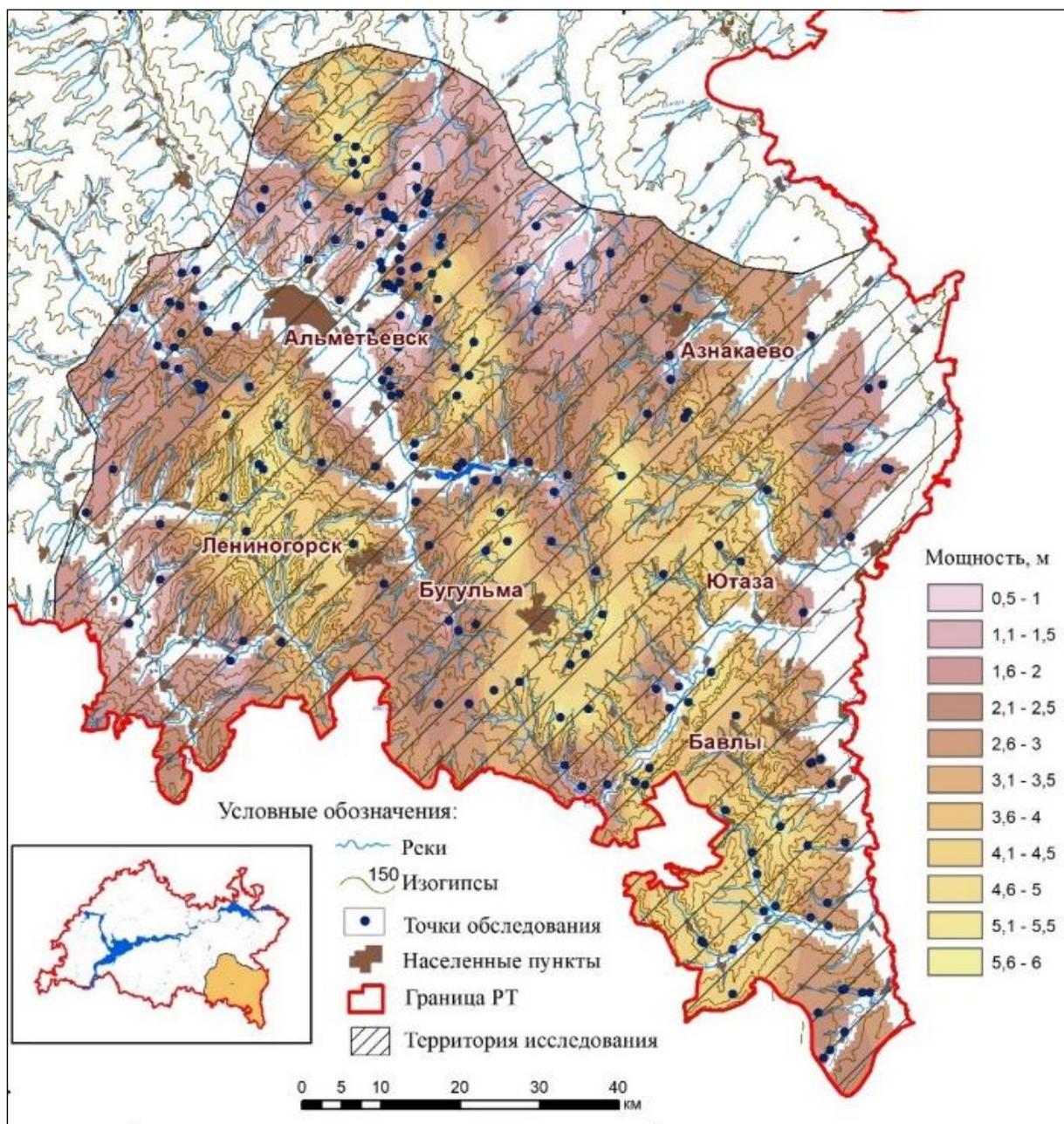


Рис. 3.11. Карта распространения элювиальных грунтов на территории Бугульминского плато

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. В строении молодых кор выветривания хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных карбонатных пород. В соответствии классификацией грунтовых массивов согласно ГОСТ 25100-2020 [32] горизонты структурного и бесструктурного элювия можно распределить на зоны выветрелых пород по степени экзогенного изменения.

2. По результатам рекогносцировочного маршрутного обследования впервые была построена карта распространения мощности элювиальных грунтов в программной среде ArcMap 10.8. Анализ распространенности мощности элювиальных отложений показал, что в пределах всей территории Бугульминского плато широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования [20]. Они покрывают практически все выположенные вершины эрозионно-денудационных останцев [20], где можно наблюдать наиболее мощный и полный профиль с хорошо обособленными генетическими горизонтами структурного и бесструктурного элювия. Общая мощность элювиальных отложений составляет от 4,0 до 6,0 м. На склонах останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала [20]. Данные участки 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. Преимущественно отложения представлены бесструктурным горизонтом с мощностью до 1,5 м.

3. В результате проведенной работы было подтверждено, 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.

ГЛАВА 4. СОСТАВ И СВОЙСТВА КАРБОНАТНЫХ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

4.1 Инженерно-геологические свойства и классификация элювиальных грунтов

Физико-механические характеристики грунтов изучались в лабораториях грунтоведения и механики грунтов Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ в соответствии с требованиями СП 47.13330.2016 [114], СП 22.13330.2016 [115] с соблюдением ГОСТ 25100-2020 [32], 5180-2015 [35], 30416-2020 [34], 12248-2020 [30], 12536-2014 [31], а также рекомендаций по оценке инженерно-геологических свойств элювия карбонатных грунтов и учету их изменения при строительстве (ПНИИС г. Москва, 1986 г) [99]. Деформационные и прочностные свойства грунтов определялись в приборах одноосного сжатия АСИС НПП «Геотек» (г. Пенза) [30]. Важнейшими специфическими особенностями элювиальных грунтов являются: значительная неоднородность по глубине и в плане из-за наличия грунтов с резким различием прочностных и деформационных характеристик; склонность к снижению прочности во время их преобразования в открытых котлованах. Как было показано выше, на исследуемой территории в строении молодых кор выветривания хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия [17], отличающиеся различной интенсивностью преобразования исходных карбонатных пород. В соответствии с классификацией грунтовых массивов согласно ГОСТ 25100-2020 [32] горизонты можно распределить на зоны выветрелых пород по степени экзогенного изменения. Зоны были изучены на физико-механические свойства:

БЕССТРУКТУРНЫЙ ЭЛЮВИЙ

Зона А в большинстве случаев представлена карбонатно-глинистой мукой с включением дресвы и щебня карбонатных пород. В инженерно-геологическом отношении исследуемые грунты можно классифицировать как карбонатные легкие суглинки с полутвердой и тугопластичной консистенцией или же как тяжелые суглинки от твердой до мягкопластичной консистенции с включениями дресвы карбонатных пород, в редких случаях как дресвяно-щебнистый грунт с пылеватым и песчаным заполнителем. Пластичность карбонатной муки обеспечивается наличием частиц мельче 0,01 мм или, в некоторых случаях, присутствием глинистой компоненты. Числа пластичности находятся в пределах 8–17. 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. Результаты исследований со средними, минимальными и максимальными значениями показаны в таблице 4.1.

Карбонатно-глинистая мука отличается значительной неоднородностью гранулометрического состава. На изучаемой территории коэффициент неоднородности достигает значения $C_u=30$. Самые мелкие обломки имеют размеры 0,001–0,002 мм и являются отдельными зернами доломита с ромбоэдрической формой (табл.4.2). Песчаная, пылеватая и дресвяная фракции имеют угловатую форму. Содержание дресвы и щебня в карбонатных суглинках составляет 5–49 %, в дресвяно-щебнистых грунтах – от 50 до 70%. Фильтрационная способность крупнообломочных элювиальных грунтов определяется в значительной степени крупностью их частиц, коэффициенты фильтрации имеют значения от десятых до целых чисел м/сут. Включения карбонатных пород (дресва и щебень) имеют сильную степень выветрелости, растираются руками и размягчаются в воде.

ЗОНЫ Б, В, Г сложены карбонатными породами разной степени трещиноватости. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности [20]. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, способствующая увеличению скорости выветривания основных пород и изменению физико-механических свойств [20]. Результаты исследований со средними значениями физико-механических свойств описаны ниже и представлены в таблице 4.3.

ЗОНА Б

Известняки или доломиты светло-серые, участками темно-серые, участками окремнелые, кавернозные. Прослеживаются в виде линз и прослоев, часто разрушенные до плитчатого, мелкокоробчатого с прослоем карбонатно-глинистой муки. Согласно Приложениям Б ГОСТ 25100–2020 по прочности классифицируются как малопрочные грунты (предел прочности на одноосное сжатие $R_c=6,5-10,2$ МПа), по плотности скелета – как средней плотности и плотные грунты. Карбонатные породы сильновыветрелые (коэффициент выветрелости $K_{wr}<0,80$ и неразмягчаемые (коэффициент размягчаемости $K_{sof}<0,75$). Средняя плотность 2,2–2,5 г/см³, пористость 11,6-13,5 %.

Таблица 4.1 – Физические свойства бесструктурного элювия ЗОНА А

Район РТ	Мин-макс/среднее	Плотность частиц грунта, г/см ³	Пористость, %	Влажность природная, %	Плотность грунта прир. сложения, г/см ³	Число пластичности	Показатель текучести	Коэф. фильгр.,		Отн. содержание органич. веществ, %	Модуль деформации, МПа
								природног о сложения	м/сут.		
		r _s	n	W	r	I _p	I _L				R _c
Бугульминский	Мин-Макс	2,42 ÷	40,8 ÷	1,61 ÷	1,18 ÷	10,1 ÷	0,1 ÷	0,7	0,2 ÷	16 ÷	
		2,5	42,3	11,86	2,42	15,7	0,5	÷12,8	1,4	25	
	Среднее	2,46	41,5	6,74	1,8	12,93	0,28	9,76	0,8	20,5	
Бавлинский	Мин-Макс	2,05 ÷	37,5 ÷	0,21 ÷	1,27 ÷	10,87 ÷	0,04 ÷	0,26 ÷	0,70 ÷	30 ÷	
		2,69	39,4	22,14	2,56	14,77	0,34	13,9	1,2	41	
	Среднее	2,37	38,4	11,18	1,92	12,82	0,19	7,09	0,9	35,5	
Ютазинский	Мин-Макс	2,13 ÷	48,2 ÷	1,05 ÷	1,16 ÷	3,74 ÷	0,05 ÷	0,39 ÷	0,79 ÷	20 ÷	
		2,65	51,7	12,29	2,59	12,6	0,23	11,8	1,9	29	
	Среднее	2,39	50,0	6,67	1,88	8,17	0,14	6,03	1,0	24,5	
Альметьевский	Мин-Макс	2,16 ÷	40,1 ÷	0,58 ÷	1,29 ÷	5,53 ÷	0,02 ÷	4,77 ÷	0,16 ÷	14 ÷	
		2,67	45,3	11,89	2,23	13,61	0,30	14,6	1,1	22	
	Среднее	2,42	42,7	6,24	1,76	9,57	0,16	9,69	0,63	18	
Ленингорский	Мин-Макс	2,20 ÷	31,2 ÷	0,23 ÷	1,24 ÷	12,35 ÷	0,05 ÷	0,52 ÷	0,31 ÷	38 ÷	
		2,83	36,1	7,05	2,74	14,34	0,5	12,1	1,6	56	
	Среднее	2,52	34,1	3,64	1,99	13,35	0,28	6,33	1,0	33	

Таблица 4.2 – Гранулометрический состав грунтов бесструктурного элювия ЗОНА А в карьерах, расположенных в различных районах Татарстана

Местоположение карьера		Содержание обломочных частиц во фракциях, %								C _u
		<10,0	10,0-5,0	5,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1	
Лениногорский район (26 карьеров)	мин	11,5	20,9	24,4	14,9	10,8	9,0	5,4	3,1	9,5
	макс	39,9	11,6	28,5	3,2	10,6	2,4	3,1	0,7	12,5
Ютазинский район (25 карьеров)	мин	1,0	7,0	23,3	26,4	18,1	8,7	7,2	8,3	16,6
	макс	23,0	28,2	20,9	7,5	7,8	2,0	9,8	0,8	21
Бавлинский район (30 карьеров)	мин	25,3	11,5	11,8	9,2	8,8	7,9	12,6	12,9	1,4
	макс	53,6	29,5	12,7	1,2	1,0	0,4	1,0	0,6	30
Бугульминский район (45 карьеров)	мин	18,7	11,9	14,6	11,8	11,8	7,8	13,0	10,4	12
	макс	32,2	18,1	12,6	13,8	12,3	5,6	4,8	5,6	26
Альметьевский район (45 карьеров)	мин	25,2	8,8	13,8	18,4	14,2	12,5	3,8	3,3	6,6
	макс	38,3	18,9	23,6	5,1	5,2	2,8	3,8	2,3	16,7
Азнакаевский район (30 карьеров)	мин	8,9	12,0	28,2	15,3	17,8	8,4	6,7	2,7	10
	макс	41,5	15,8	10,2	6,0	8,1	4,6	7,5	6,3	29,5

ЗОНА В

Известняки или доломиты светло-серые, плотные, крепкие, тонко и мелкозернистые, тонкоплитчатые, органогенные, кавернозные (каверны выполнены кальцитом или тонким прослоем глин), разбит на крупные, глыбовидные, сундучные отдельности.

Средняя плотность находится в пределах 2,5–2,7 г/см³, пористость 6,2–10,5 %. Водопоглощение 0,34-1,9 %. Предел прочности на одноосное сжатие R_c=124-60,5

МПа. Карбонатные породы выветрелые (коэффициент выветрелости $0,8 < K_{\text{врт}} < 0,9$) и практически не размягчаемые (коэффициент размягчаемости $K_{\text{соф}} > 0,75$).

В таблице 4.3 показаны механические свойства грунтов различных зон трещиноватости массива.

Таблица 4.3 – Предел прочности на одноосное сжатие (R_c) различных частей карбонатных массивов по районам Татарстана

Район РТ (количество карьеров)	Средние значения R_c , МПа			
	Зона Г массивный слабо измененный известняк	Зона В трещиноватый известняк подошвы структурного элювия	Зона В трещиноватый известняк кровли структурного элювия	Зона Б трещиноватый известняк бесструктурного элювия
Азнакаевский район (30 карьеров)	63,1÷95,3	40,4÷55,2	18,1÷35,2	7,6÷11,1
Альметьевский район (45 карьеров)	51,4÷106,5	35,5÷60,5	12,0÷30,5	6,5÷10,0
Бавлинский район (30 карьеров)	68,1÷118,1	35,4÷59,2	18,7÷29,2	8,1÷11,7
Бугульминский район (45 карьеров)	50,8÷95,6	37,5÷47,5	14,2÷27,5	8,9÷11,2
Ютазинский район (25 карьеров)	56,7÷115,9	42,0÷52,0	12,4÷32,0	6,7÷10,4
Лениногорский район (26 карьеров)	69,7÷104,57	30,1÷57,1	18,2÷27,1	8,2 ÷ 10,1

По результатам изучения физико-механических свойств в разрезах карбонатных массивов отмечается, что снизу вверх, по мере увеличения

интенсивности трещиноватости, происходит последовательное ухудшение механических свойств пород [20]. Прочные ($R_c=120-50$ МПа) карбонатные породы переходят сначала в группу скальных пород средней прочности ($R_c=10-50$ МПа), а затем в группу скальных малопрочных грунтов ($R_c \leq 10$ МПа).

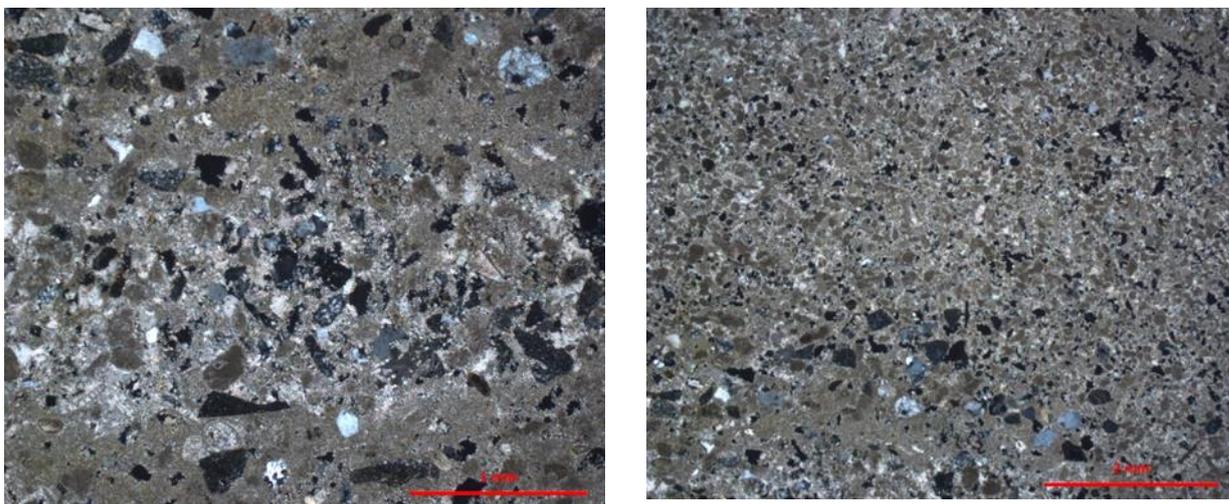
4.2 Минеральный и химический состав

По результатам оптико-микроскопического анализа было выделено два основных структурно-минералогических типа современных элювиальных кор выветривания [20] представленных на рисунках 4.1 и 4.2.

Первый тип (Зона В/Б-I) карбонатных пород представлен тонкослоистыми или массивными известняками (рис.4.1).

На изучаемой территории преимущественно развит известняк пелоидно-комковатый пакстоун, алевропесчанистый, пористый, с линзовидно-слоистой текстурой за счет неравномерного выщелачивания [66].

Независимо от текстурных признаков все грунты характеризуются светло-серой окраской, с буроватым оттенком за счет ожелезнения, неравномерно-зернистой структурой, линзовидно-слоистой или скрытозернистой текстурой плотным сложением [66]. Известняк на 50-60% сложен органическими остатками, на 15-20% -



А

Б

Рис.4.1. Микроскопическая структура известковистых пород в скрещенных николях: А) Известняк алевропесчанистый; Б) Известняк пелоидно-комковатый цементирующим минеральным веществом [66]. Органические остатки размером 0,1-0,5 мм представлены сфероидальными комковатыми агрегатами, сложенными

микрзернистым кальцитом [66]. Аллотигенный материал представлен угловатыми и полуокатанными, изометричными и удлиненными по облику обломками горных пород (65%), зернами кварца (20%) и плагиоклазов (10%), чешуйками мусковита и хлорита (5%) [66]. Форменные элементы разобщены в породе, лишь участками соприкасаются между собой краями. Органические остатки и аллотигенные обломки сцементированы кальцитовым цементом [66]. Цемент базально-порового типа, по структуре микро-тонкозернистый, неравномерно выщелочен из межформенного пространства, часто присутствует в виде тонких оторочек вокруг органических остатков. В плотных участках породы цемент одновременно является цементом выполнения, полностью заполняет все межформенное пространство. В кальцитовой микро-тонкозернистой массе цемента отмечаются темно-бурые включения глинистого материала. Известняк содержит 5-10% пор. Поры выщелачивания межформенные, сообщающиеся образуют извилистые каналы диаметром 0,05-0,1 мм [66]. В неизменном состоянии известняк содержит слойки и линзочки терригенного материала, представленного обломками пород, зернами кварца, полевыми шпатами, чешуйками мусковита или органические остатки размером 0,1-0,25 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 [66].

Второй тип (Зона В/Б-II) карбонатных пород представлен тонкослоистыми или массивными доломитами (рис.4.2).

Доломит седиментационно-диагенетический, строматолитовый, пелитоморфный, плотный, светло-серый, с волнисто-слоистой текстурой.

По данным оптико-микроскопических исследований структура породы пелитоморфная, текстура – волнисто-слоистая [66]. В площади шлифа фиксируется фрагмент строматолитовой постройки в виде переслаивания тонких волнистых слойков, одни из которых сложены пелитоморфным доломитом, другие – микро-тонкозернистым доломитом. В отдельных слойках отмечаются темно-бурые включения глинистого материала. В пелитоморфных слойках присутствуют редкие рассеянные включения (5%) органических остатков, представленных кальцисферами, онколитами и створками остракод [66]. Часть створок сомкнутые, что указывает на их

относительно быстрое захоронение. Помимо органических остатков в доломитах присутствуют редкие включения аллотигенных зерен кварца и чешуек мусковита алевритовой размерности [66].

Породы содержат 5-6% пор, представленных камерами газовых пузырьков, выделяемых строматолитовыми колониями в процессе жизнедеятельности. Поры преимущественно изометричные, сфероидальные, размером 0,05-0,1 мм. По границам волнистых слоев фиксируются щелевидные, протяженные поровые каналы. Часть стенок пор инкрустированы аутигенными зернами кальцита размером 0,05-0,15 мм [66].

Доломит седиментационно-диагенетический микрозернистый, плотный, светло-серый с буроватым оттенком за счет вкраплений глинистого материала, с массивной текстурой [66]. Полностью сложен соприкасающимися ксеноморфными зернами размером около 0,05 мм, образующими плотные агрегатные сростки. В межзерновом пространстве доломитов присутствуют темно-бурые включения глинистого материала, равномерно распределенные в породе [66]. Из аутигенных



Рис..4.2. Микроскопическая структура доломитовых пород в скрещенных николях:

А) Доломит седиментационно-диагенетический микрозернистый, плотный, светло-серый с буроватым оттенком за счет вкраплений глинистого материала с массивной текстурой; Б) Доломит седиментационно-диагенетический, строматолитовый, пелитоморфный, плотный, светло-серый с волнисто-слоистой текстурой

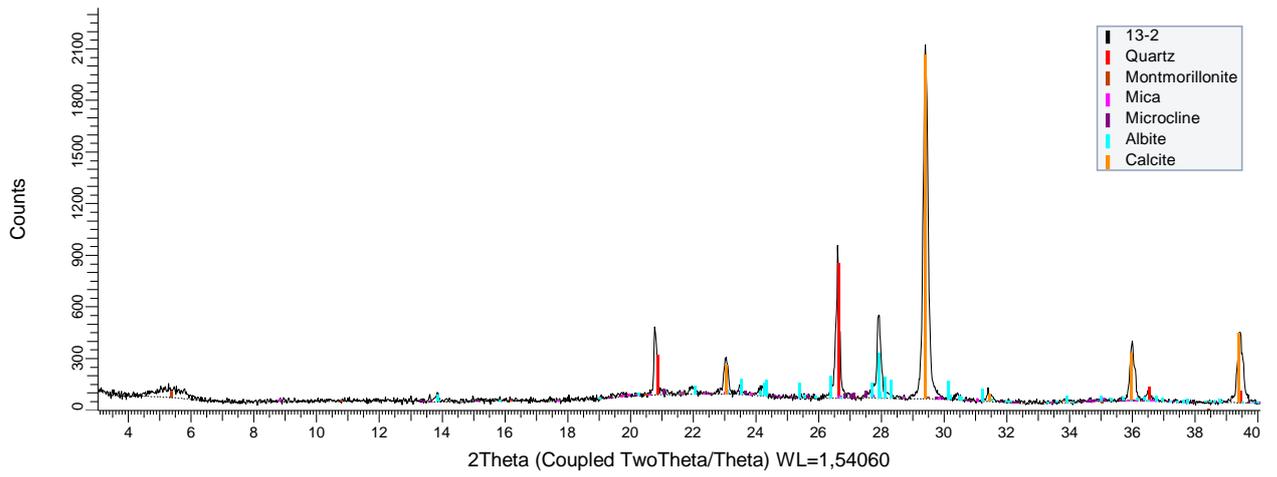
минералов отмечаются редкие агрегаты пирита размером около 0,05 мм. Породы содержат 2-4% пор. Поры межзерновые, субкапиллярной размерностью, участками отмечаются расширения поровых каналов до 0,05 мм [66].

Доломиты формировались в мелководных условиях осолоняющегося эпиконтинентального морского бассейна казанского века. Наличие небольшого количества терригенного материала указывает на удаленность береговой линии, возможно карбонатная аккумуляция осуществлялась в пределах небольшого подводного поднятия донного рельефа.

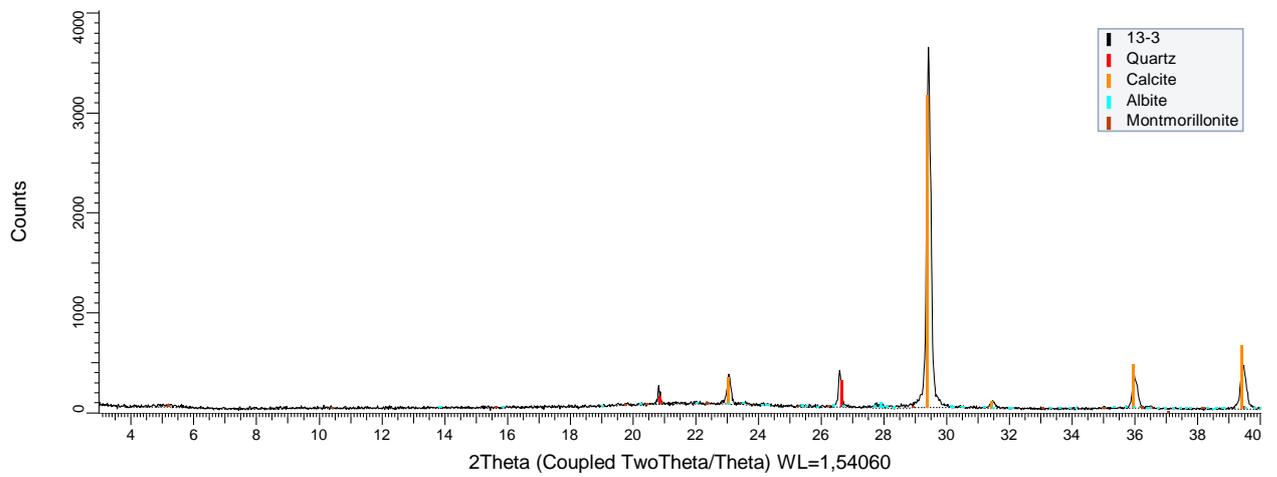
Продуктами физической дезинтеграции основных структурно-минералогических типов является карбонатная мука, различная по минеральному составу и физико-механическим свойствам.

Минеральный состав грунтов изучался на рентгеновском дифрактометре D2 Phaser (Брукер, Германия). Съемка проводилась на порошковых препаратах, которые при необходимости насыщались этиленгликолем (для определения состава глинистой компоненты). Съемка осуществлялась при следующих параметрах: напряжение рентгеновской трубки - 30 kV, ток 10 mA, шаг сканирования – 0,02°, скорость - 1 град/мин. Диапазон измерения составлял от 10 до 60° по 2 θ . Диагностика минеральных фаз на рентгеновских спектрах проводилась с использованием международной базы данных порошковых рентгенографических стандартов. Полуколичественный рентгенографический анализ выполнялся с помощью программного обеспечения DIFFRACplus Evaluation Package — EVA Search/Match представленный на рисунке 4.3.

Результаты анализа представлены в таблице 4.4. Минеральный состав бесструктурного карбонатного элювия, в силу незавершённости процесса выветривания, характеризуется широким диапазоном процентного содержания минералов. В таблице 4.4 отчетливо прослеживается величина зерен исходной породы и степень ее разрушенности (по мере выщелачивания повышается дисперсность и однородность состава муки, изменяется соотношение кальцита, доломита и нерастворимых примесей).



A)



Б)

Рис. 4.3. Рентгеновская дифрактограмма минерального состава элювиальных карбонатных пород: А) Рентгеновская дифрактограмма карбонатно-глинистой муки; Б) Рентгеновская дифрактограмма известняка

Таблица 4.4 – Минералогический состав карбонатного элювия

Литология карбонатных пород	Минералогический состав (вес, %)						
	Доломит	Кальцит	Альбит	Кварц	Монтмо- рилонит	Микро- клин	Каолин
Зона В/Б - I Известняк (10 образцов)		<u>88÷96</u> 92	<u>2÷6</u> 4	<u>2÷6</u> 4			
Зона В/Б - II Доломит (10 образцов)	<u>78÷91</u> 84	<u>4÷7</u> 8	<u>2÷6</u> 4	<u>2÷6</u> 4			
Зона А - I Карбонатно- глинистая мука (20 образцов)	<u>1÷4</u> 2	<u>35÷50</u> 43	<u>20÷30</u> 25	<u>10÷15</u> 13	<u>6÷12</u> 9	<u>2÷10</u> 5	<u>1÷5</u> 3
Зона А - II Карбонатно- глинистая мука (20 образцов)	<u>32÷64</u> 48	<u>5÷10</u> 7	<u>10÷25</u> 17	<u>10÷25</u> 17	<u>1÷10</u> 5	<u>1÷5</u> 3	<u>1÷5</u> 3

Средние значения процентного содержания химических компонентов, которым характеризуются зоны элювия, отражены в диаграммах изменения химического состава известняка под действием физического выветривания (рис. 4.4). Химический анализ подтверждает ранее полученные результаты рентгенографического анализа. В исходных карбонатных породах зоны В и Б преобладают кальций и кислород, входящие в состав кальцита (CaCO_3). В качестве примесей присутствуют магний (Mg), входящий в состав доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), кремний (Si), алюминий (Al) и калий (K), входящие в состав кварца SiO_2 , альбита $\text{Na}[\text{Al},\text{Si}_3\text{O}_8]$ и мусковита $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$. В плитчатых известняках (зона Б подзона I) появляется железо, привнесенной инфильтрационными водами. В составе карбонатной муки зоны Б подзона II содержание кальцита уменьшается за счет растворения кальцита и выноса ионов Ca^{2+} , а доля других элементов, слагающих водоустойчивые минералы

увеличивается. Совместные доли кремния и алюминия в карбонатной муке зоны связано с накоплением глинистых минералов.

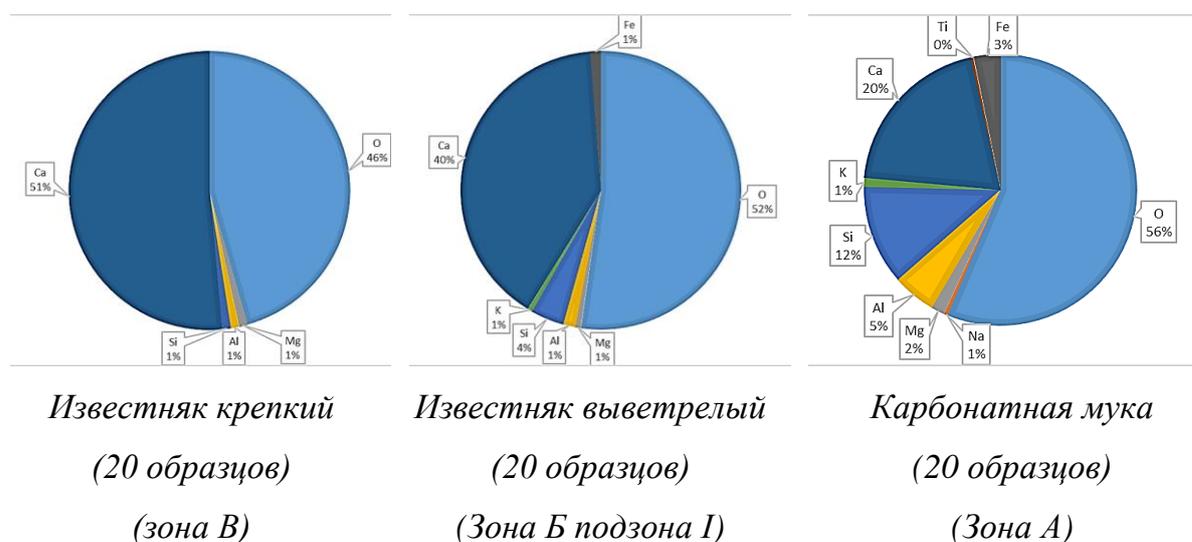


Рис. 4.4. Диаграмма изменения химического состава известняка под действием физического выветривания

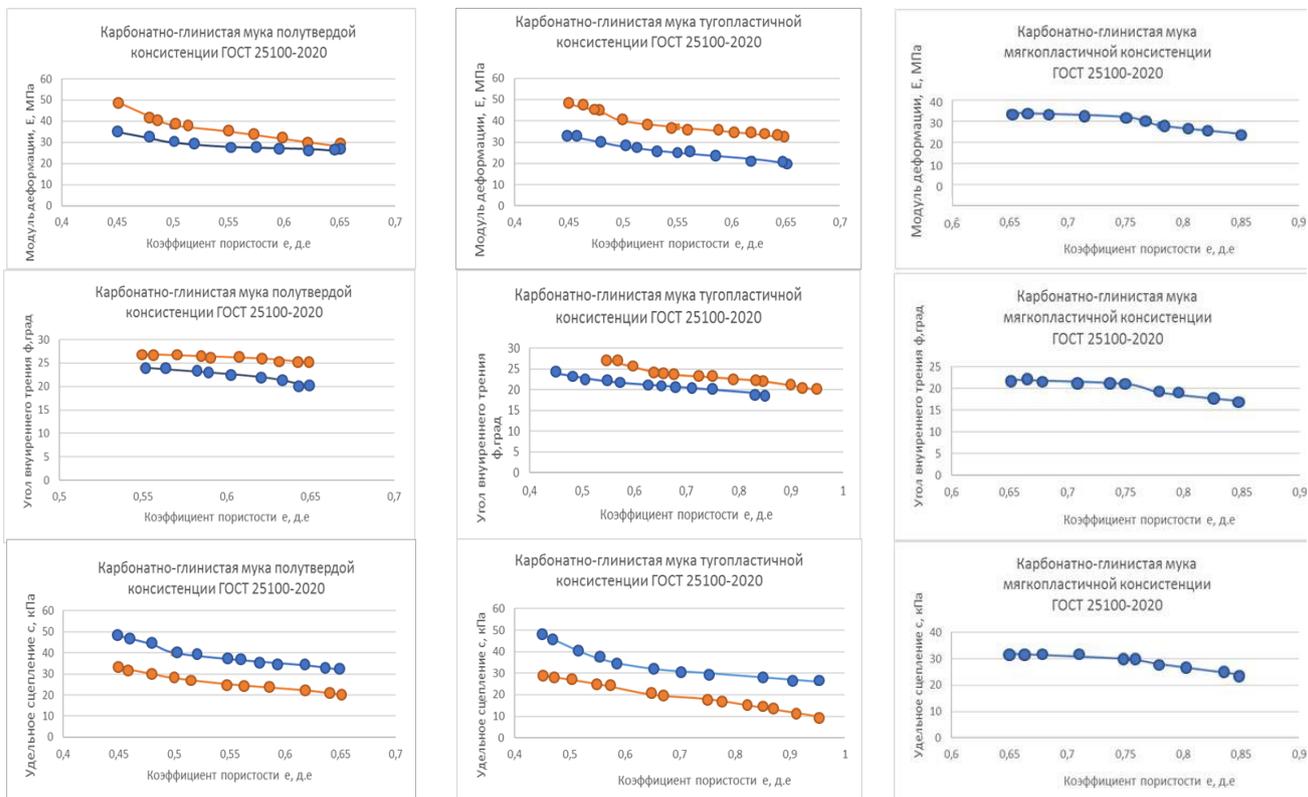
На основании инженерно-геологической классификации с учетом минерального состава и физико-механических свойств на территории Бугульминского плато выделяются 2 основные разновидности карбонатно-глинистой муки:

I. Карбонатно-глинистая мука (кальцитовая) с включением дресвы и щебня карбонатных пород. По классификации ГОСТ 25100–2020 соответствует легким суглинкам полутвердым и тугопластичным с числами пластичности 8–12 и показателем текучести от 0,05 до 0,48. 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 38,68–43,25%. Модуль деформации находится в пределах 21–49 МПа, угол внутреннего трения – 20–27°, удельное сцепление – 10–33 кПа.

II. Карбонатно-глинистая мука (доломитовая) с включением дресвы и щебня карбонатных пород. В подавляющем большинстве случаев классифицируется как тяжелые суглинки с числами пластичности 12–17. Консистенция от твердой до мягкопластичной. 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 15–35 МПа, угол внутреннего трения - 17-24°, удельное сцепление – 24–48 кПа.

Результаты лабораторных испытаний карбонатной муки известковистой и доломитовой представлены на рисунке 4.5



Карбонатно-глинистая мука доломитового состава

Карбонатно-глинистая мука известкового состава

Рис. 4.5. Физико-механические свойства бесструктурного элювия (зона А)

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

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

2. На основании инженерно-геологической классификации с учетом минерального состава на территории Бугульминского плато Зона А представлена двумя основными разновидностями карбонатно-глинистой муки – кальцитовой и доломитовой, отличающихся своими физико-механическими свойствами:

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.

3. По результатам литолого-минералогических исследований элювиальные отложения были подразделены на две основные разновидности современных элювиальных кор выветривания – Зону Б и Зону В.

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.

4. Зона Г на исследуемой территории представлена известняками или доломитами плотными, крепкими, участками окремнелыми, органогенными, кавернозными. 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 слабыветрелые).

ГЛАВА 5 ХАРАКТЕРИСТИКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

В настоящей работе под суффозионным процессом (Хоменко В.П. 2003 г) [135] понимается разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и цементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов [135]. Результатом суффозионного процесса, являются подземные и поверхностные эрозионные и аккумулятивные формы – полости, зоны разуплотнения, воронки, ниши, конуса выноса и т.д.

Суффозию подразделяют по характеру разрушения грунтов на два типа – химическую и механическую (Ломтадзе В.Д. [69]; Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А.[11]; Осипов В.И. [91-92]; Попов И.В [101]; Уткин М. М. [131]; Хоменко [134-135]; Аникеев А.В. [3] и др.). Подтипы выделяются по условиям движения подземных вод. Условия движения, в свою очередь, зависят от того, в каких коллекторах –

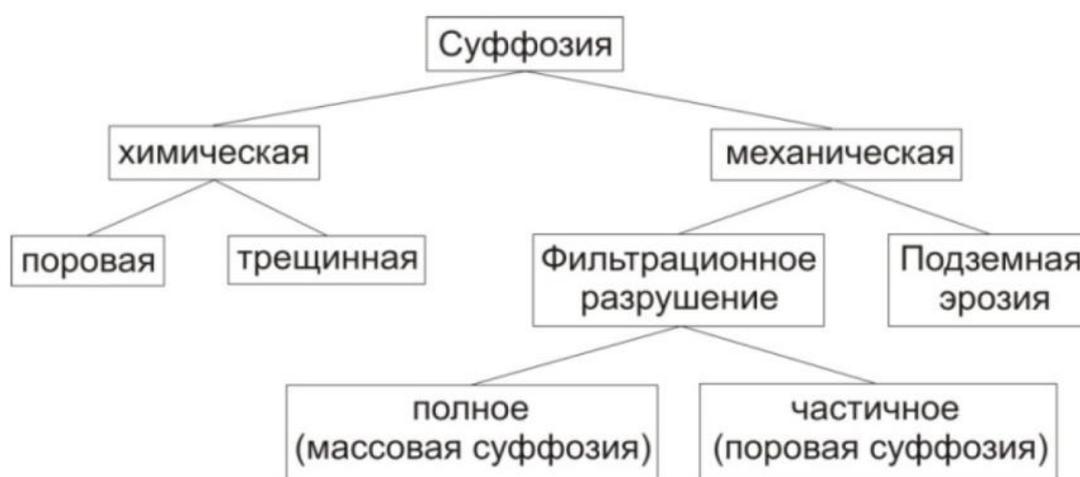


Рис. 5.1. Классификация суффозии по характеру разрушения горных пород

(по В.П. Хоменко, 2003 г)[135]

трещинах или порах – находятся эти воды. Соответственно в каждом типе различают два подтипа – трещинный и поровый для первого типа, подземная эрозия и фильтрационное разрушение – для второго[3].

В настоящее время суффозия чаще всего рассматривается как вынос глинистых, пылеватых и мелких песчаных частиц потоком подземных вод (механическая суффозия) (Аникеев А.В. Калинин Э.В., Тараканов С.И. [6]; Анисимов

В.В., Тер-Мартirosян З.Г. [127-128]; Газизов М.С. [22]; Голубева Л.В [23]; Жиленков В.Н.[47] и др.).

Механическая суффозия может приводить к фильтрационным деформациям рыхлых отложений, а также к размыву заполнителя подземных полостей в трещины скальных и полускальных пород. Именно данная суффозия считается наиболее опасной [135].

В результате суффозионного разрушения горных пород ухудшаются их прочностные и деформационные характеристики, а также увеличивается проницаемость. Когда испытывавшие суффозионное разрушение породы находятся в зоне взаимодействия с каким-либо инженерным сооружением, это может привести к его деформированию. Взаимодействие суффозионных процессов с объектами промышленного и гражданского строительства нередко приводит к серьезному ущербу и даже к катастрофическим последствиям. Существенным недостатком большинства исследований является то, что процессы суффозии изучаются либо с точки зрения решения конкретной узкой практической задачи с применением расчетов по существующим методикам, либо на основании совместного учета действия наиболее существенных факторов развития неблагоприятных процессов. К наиболее свежим работам в области суффозионной опасности следует отнести следующие работы: Хоменко В.П., Коломенский Е.Н.[136]; Аникеев А.В. и Чумаченко С.А. [4]; Строкова Л.А., Леонова А.В [124]; Строкова Л.А., Епифанова Е.А.[123]; Кожеватов Е.Д. [59]; Костарев В.П. [58]; Димухаметов Д.М., Новопоселенских Л.А., Бахарева Н.С. [41]; Дробинина Е.В., Катаев В.Н. [42]; Дублянский В.Н., Клименко В.И., Михайлов А.Н. [43]; Катаев В.Н.[52-53]; Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М [54]; Кухарев Н.М.[65]; Торсуев Н.П. [129]; Anikeev A, Chumachenko S [147]; Derakhshan-Babaei F., Nosrati K., Tihomirov D. et al.[150]; E. Khrumchenkov, M. Khrumchenkov, D. Demidov, and A. Garaeva [154]; Strokov L [160-161]; Meyer N., Kuhwald M., Petersen J. et al.[157]; Latypov A, Zharkova N, Mouraviev F.[155]; Dong X., Cohen M., Martin J. et al.[151], Startsev A [160].

5.1. Количественная оценка суффозионности грунтов бесструктурного элювия

Для оценки суффозионности элювиальных грунтов бесструктурного элювия были использованы методики П-56-90/ВНИИГ [94] и П-49-90/ВНИИГ [93]. Прежде

всего необходимо определить, к какой категории относится заданный состав по характеру суффозионности [67]. Для решения этого вопроса рекомендуются два способа: первый способ характеризует несуффозионность грунта, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц d_{min} . При этом несуффозионность 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 суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта.

Если окажется, что

$$d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} > d_{min}, \quad (5.1)$$

то грунт следует считать суффозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна d_{ci} — диаметра суффозионных частиц. Если окажется, что

$$d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} < d_{min}, \quad (5.2)$$

то грунт следует считать несуффозионным. Из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы— $d_{3\%}, d_{5\%}$ [7].

Диаметр максимального фильтрационного хода определяется следующими зависимостями (с учетом сегрегации грунта):

$$d_0^{max} = xC \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (5.3)$$

где x — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии. Параметр C определяется по формуле:

$$C = 0,46 \sqrt[6]{C_u}, \quad (5.4)$$

Коэффициент x зависит главным образом от коэффициента разнорзернистости грунта C_u . С некоторым запасом можно принять:

а) для гранулометрического состава грунтов с $C_u \leq 25$

$$x = 1 + 0,05C_u, \quad (5.5)$$

б) для гранулометрического состава грунтов $sC_u > 25$

$$x = 0,35(2 + \sqrt{C_u}), \quad (5.6)$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (5.7)$$

Для ориентировочной оценки суффозионной опасности грунта используют коэффициент неоднородности грансостава, если $C_u > 20$ грунт следует считать суффозионным, $C_u = 10-20$ переходные, $C_u < 10$ грунт следует считать несуффозионным.

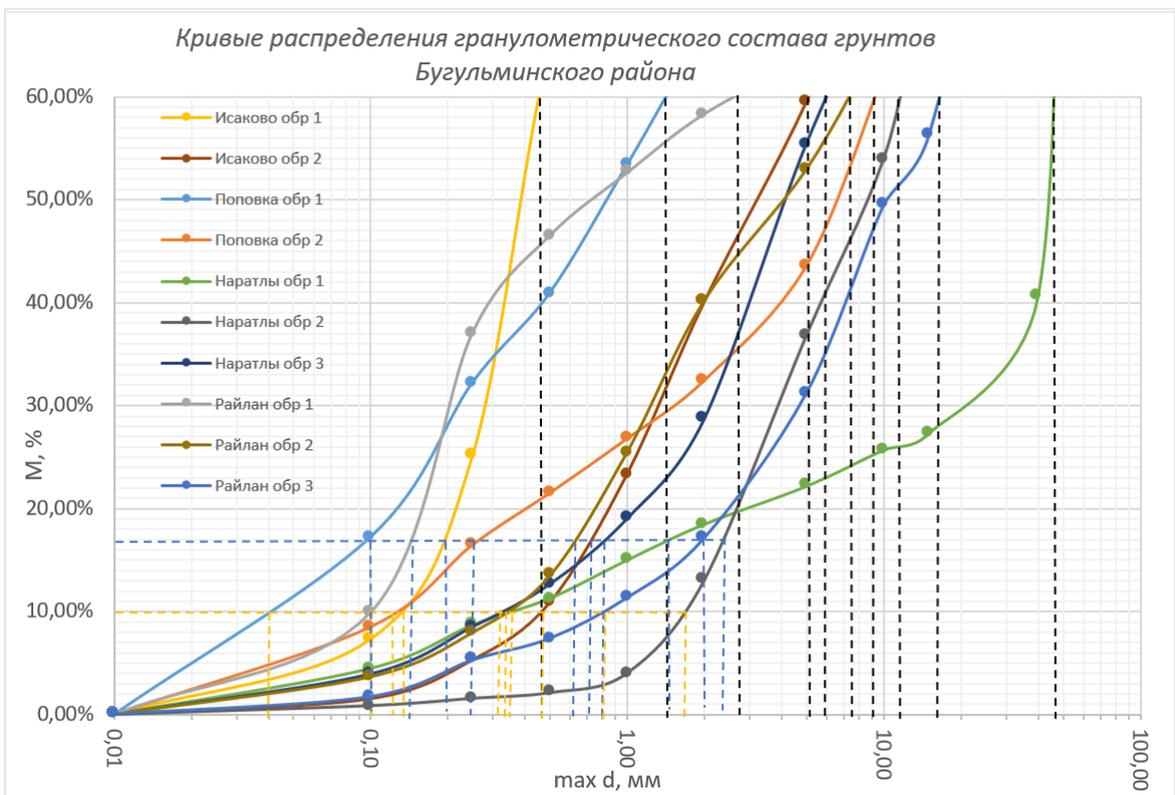
Второй способ характеризует грунт как практически несуффозионный, из которого допускается незначительный вынос мельчайших его частиц, но без нарушения прочности и устойчивости грунта [93,94,95]. Практика показывает, что если вынос самых мелких частиц из грунта не будет превышать 3—5 % по массе, то прочность и устойчивость грунта нарушается слишком незначительно. Следовательно, практически несуффозионным грунтом считается такой грунт, из которого могут быть вынесены фильтрационным потоком мельчайшие частицы не более 5 % по массе. То есть грунт следует считать несуффозионным, если параметры его гранулометрического состава удовлетворяют условию

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \quad (5.8)$$

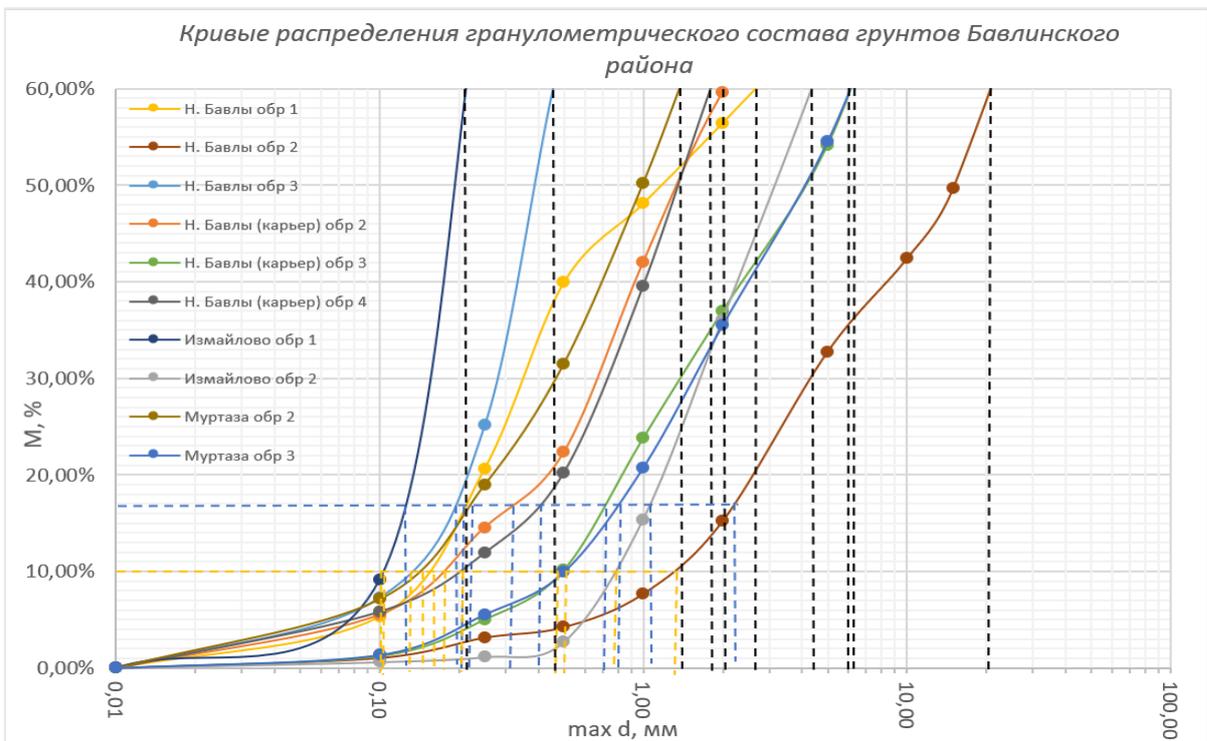
$$N = 0,10^6 \sqrt{C_u} (2 + \sqrt{C_u}) \frac{n}{1-n}, \quad (5.9)$$

Если зависимость не удовлетворяется, грунт считается суффозионным.

Гранулометрический состав элювиальных грунтов проводился согласно рекомендациям по оценке инженерно-геологических свойств элювия карбонатных грунтов и учету их изменения при строительстве [31,99]. Определение гранулометрического состава проводилось комбинированным методом. Фракции от 10 до 0,1 определяли с промывкой на ситах, мельче 0,1- ареометром. Гранулометрический состав элювиальных грунтов с фракцией крупнее 10 мм определяли сухим рассевом на ситах после предварительного высушивания пробы до воздушно-сухого состояния. По результатам гранулометрического состава грунтов были построены графики распределения, представленные на рисунке 5.2–5.4.



*Рис. 5.2. Кривые распределения гранулометрического состава грунтов
Бугульминского района*



*Рис. 5.3. Кривые распределения гранулометрического состава грунтов
Бавлинского района*

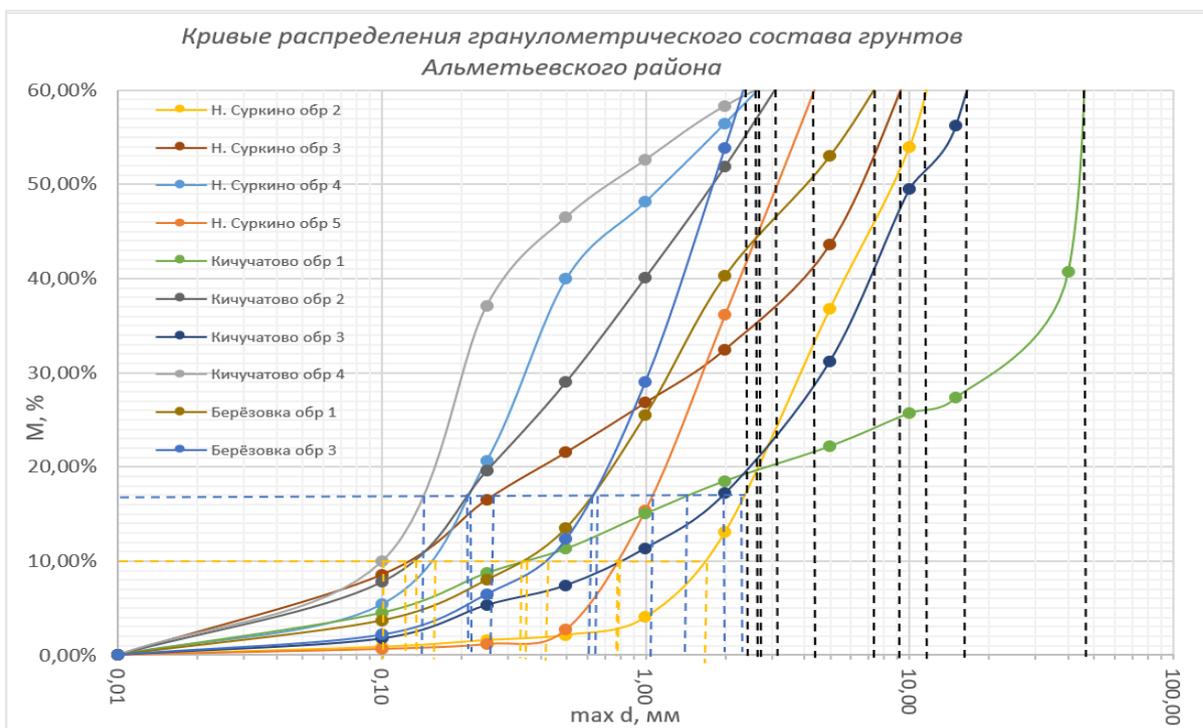


Рис. 5.4. Кривые распределения гранулометрического состава грунтов Альметьевского района

Результаты расчетного метода представлены в таблице 5.1.

Результаты изучения 201 гранулометрического состава грунтов бесструктурного элювия позволили выделить 15 разновидностей гранулометрического состава по коэффициенту неоднородности. В таблице 2 приведены осредненные результаты обработки параметров гранулометрического состава и рассчитываемых на их основе величин. Видно, что условие $\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N$, 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.

По первому условию можно видеть из Таблицы 5.1, что для диапазона C_u более 8 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.

По второму способу условие $\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N$, 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.

Таблица 5.1 – Суффозионность грунтов бесструктурного элювия (Зона А)

C_u	Размер частиц d, мм				d_5/d_{17}	N	c	d_0 max, мм	d_{ci} max, мм
	d_5 , мм	d_{10} .мм	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
2.0-4.0	0.11	0.12	0.15	0.38	0.70	0.05	0.24	0.05	0.04
4.0-6.0	0.08	0.12	0.19	0.64	0.41	0.09	0.41	0.13	0.10
6.0-8.0	0.18	0.21	0.25	1.60	0.72	0.13	0.31	0.24	0.20
8.0-10.0	0.03	0.11	0.16	1.50	0.19	0.27	1.02	0.53	0.44
10.0-12.0	0.05	0.12	0.18	1.70	0.29	0.29	1.09	0.64	0.49
12.0-14.0	0.04	0.12	0.14	2.00	0.29	0.36	1.20	0.67	0.51
14.0-16.0	0.03	0.08	0.10	1.50	0.30	0.42	1.44	0.59	0.46
16.0-18.0	0.03	0.07	0.11	1.65	0.27	0.59	1.81	1.00	0.77
18.0-20.0	0.03	0.10	0.11	2.80	0.27	0.76	2.15	1.25	0.95
20.0-22.0	0.10	0.13	0.20	2.80	0.49	0.52	1.65	1.53	1.18
22.0-24.0	0.10	0.16	0.25	3.10	0.40	0.44	1.49	1.58	1.21
24.0-26.0	0.03	0.13	0.15	3.50	0.20	0.72	2.06	1.70	1.30
26.0-28.0	0.10	0.14	0.16	4.00	0.63	0.78	2.19	2.07	1.60
28.0-30.0	0.08	0.16	0.18	4.7	0.44	0.82	2.25	2.46	1.89

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.

Для более наглядного отображения результатов была впервые построена карта степени неоднородности грунтового массива с распространением суффозионных и карстово-суффозионных воронок на территории Бугульминского плато в программной среде ArcMap 10.8 представленная на рисунке 5.5. В качестве исходных материалов были использованы данные полученные по методикам ВНИИГ [93-95].

На карту так же были нанесены точки выявленных при обследовании карстово-суффозионных форм рельефа. Необходимо отметить, что несмотря на различную природу протекания карстовых и суффозионных процессов, все обнаруженные деформации поверхности были объединены в общую группу. Это связано, во-первых, с трудностью их разделения на отдельные виды, особенно у старых форм, во-вторых – с частой взаимосвязанностью карстовых и суффозионных процессов.

Наибольшая суффозионная опасность развита на эрозионно-аккумулятивных нижних, средних частях склонов вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участок характеризуется высокими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u = 19-30$). Воронки на этих участках часто имеют провальный тип, а их диаметр достигает 10 м и более, поэтому можно говорить об одновременном протекании карстовых и суффозионных процессов на этих участках.

Наименьшая суффозионная опасность развита на эрозионно-денудационных водоразделах с наивысшими абсолютными отметками поверхности, в междуречьях рек Шешма и Степной Зай, рек Степной Зай и Мелля, рек Степной Зай, Ик и Дымка, рек Дымка Ик и Киндыз. Территория характеризуется низкими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ($C_u=0-10$). Проявление суффозионных и карстово-суффозионных процессов практически отсутствует. На других участках увеличение количества воронок соответствует увеличению коэффициента неоднородности бесструктурного элювия.

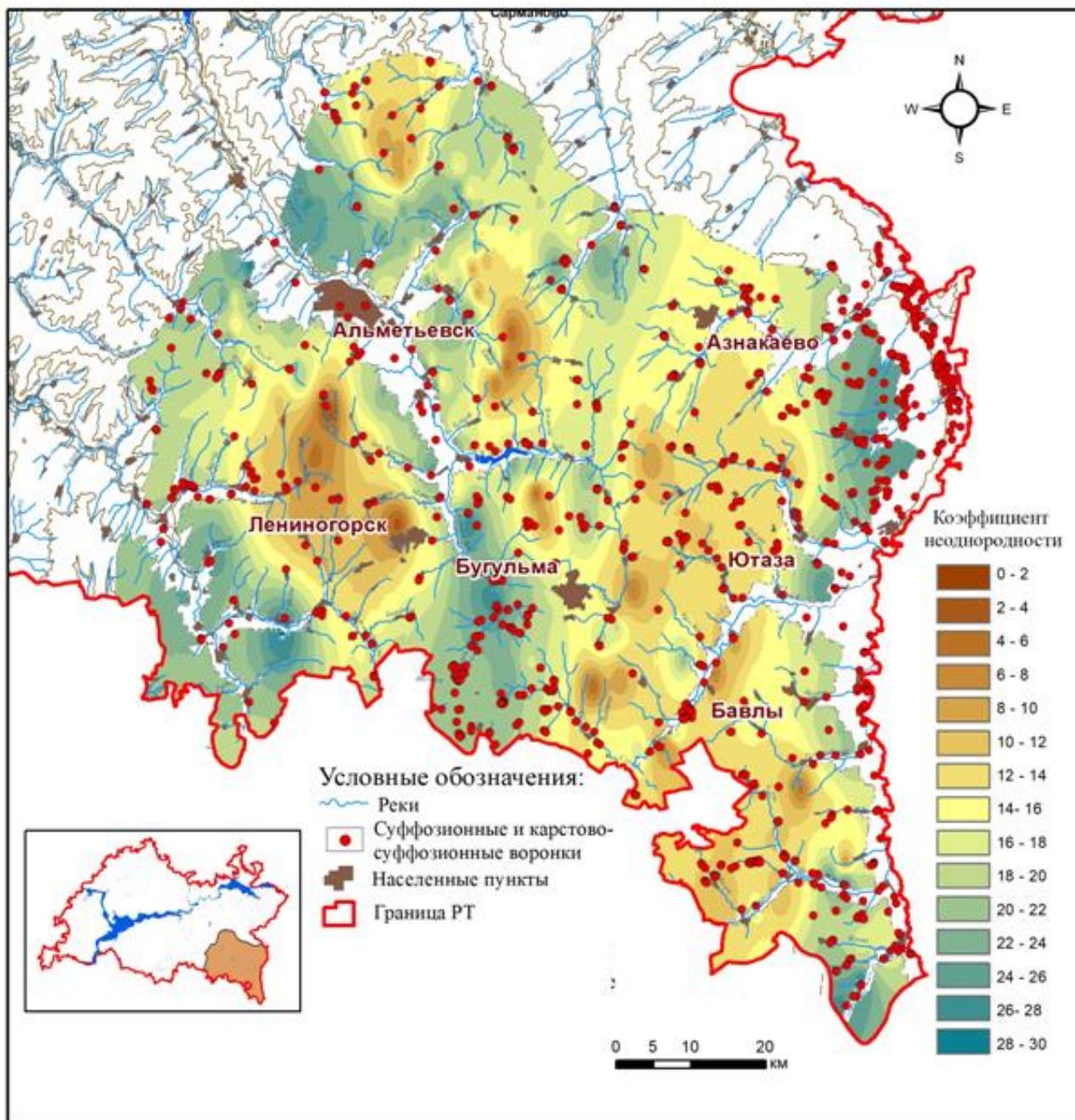


Рис. 5.5. Карта неоднородности грунта бесструктурного элювия с распространением суффозионных и карстово-суффозионных форм

5.2 Оценка трещиноватости грунтовых массивов зоны структурного элювия

Зону развития структурного элювия на территории Бугульминского плато по всем признакам относится к скальным грунтам трещиноватых массивов. В таких грунтах при расчете суффозионности 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 [119], ГОСТ 25100-2020 [32].

На этапе полевых исследований в различных частях исследуемой территории было заложено и изучено 182 площадки трещиноватости. Описание площадок приведено ниже на рисунке 5.6.–5.8.

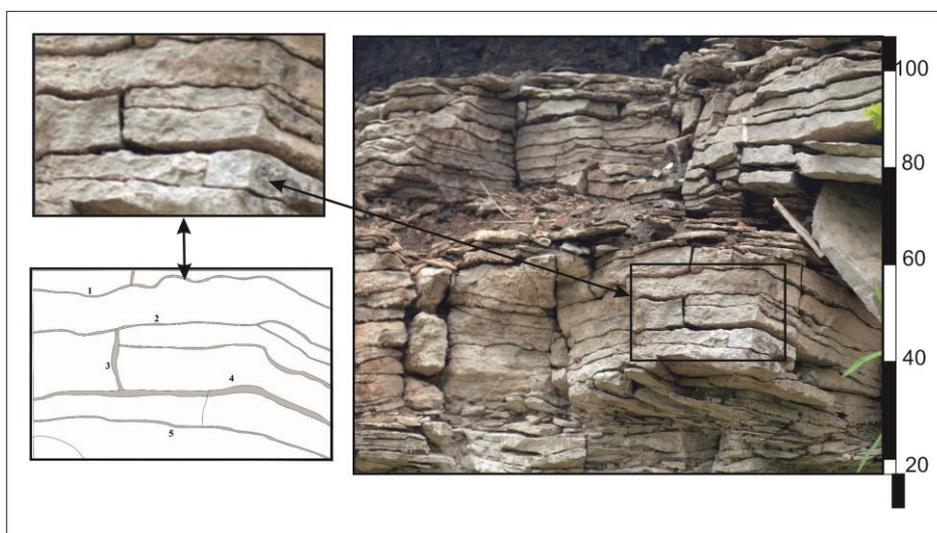


Рис.5.6 Картирование площадок трещиноватости:

Обнажение карбонатных пород п.Солдатская Письмянка Бугульминского района

(Площадка трещиноватости с размерами: 20x35 см. По характеру сложения: Слоистые. По степени открытости: открытые. По размерам: Наряду с мелкими трещинами присутствуют также крупные трещины шириной 20-100 мм. По форме - изломанные. По уклупадения - горизонтальные. По отношению к залеганию слоев: продольные, поперечные. По характеру действия сил: трещины выветривания, трещины разгрузки.)

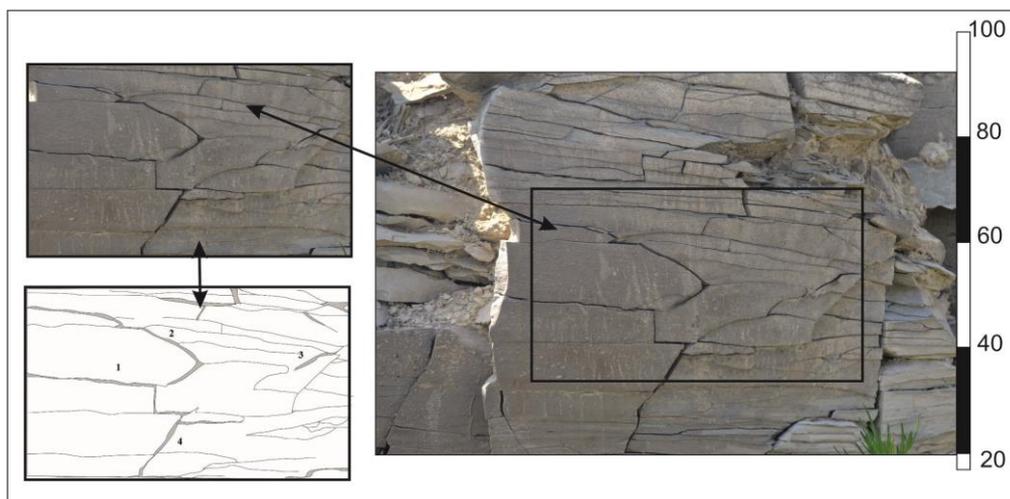


Рис. 5.7 Картирование площадок трещиноватости:

Обнажение карбонатных пород п. Огородниково Альметьевский район

(Площадка трещиноватости с размерами 20x35 см. По характеру сложения: блочные/слоистые. По степени открытости: открытые. По размерам: Наряду с тонкими трещинами шириной до 1 мм имеют место трещины шириной 2-5 мм и отдельные до 5-20 мм. По форме: изломанные. По углу падения: горизонтальные, слабонаклонные. По отношению к залеганию слоев: продольные, поперечные. По характеру действия сил: трещины выветривания, трещины разгрузки.)

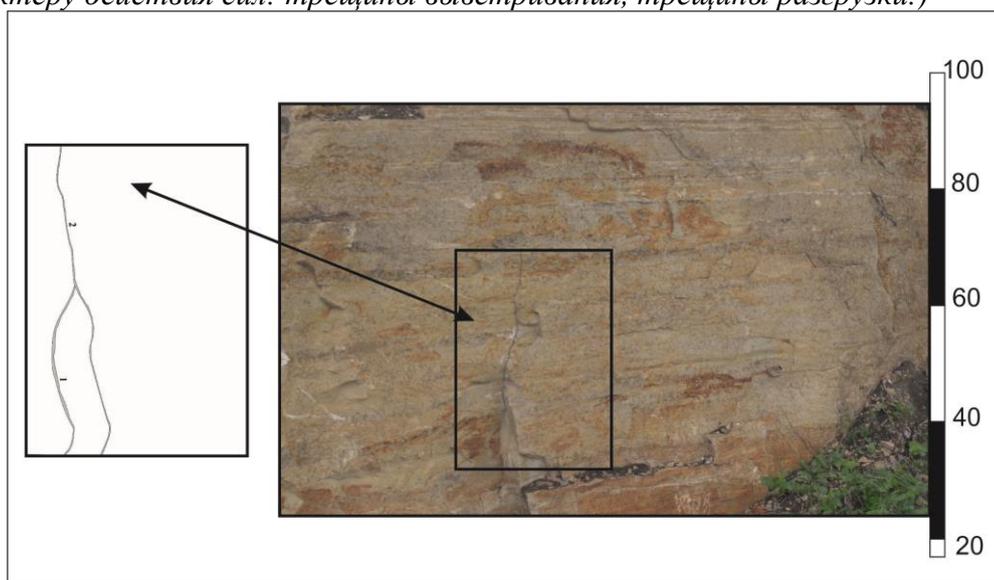


Рис. 5.8 Картирование площадок трещиноватости:

Обнажение карбонатных пород п. Керлигач Лениногорский район

(Площадка трещиноватости с размерами 30x40 см. По характеру сложения: массивные крупноблочные. По степени открытости: открытые. По размерам: развиты волосные и тонкие трещины до 1 мм, с единичными трещинами шириной до 2 мм; средние и крупные трещины отсутствуют. По форме: изломанные, прямые. По углу падения: горизонтальные, слабонаклонные. По отношению к залеганию слоев: поперечные. По характеру действия сил: трещины разгрузки.)

Расчетные значения коэффициента трещинной пустотности ($K_{ТП}$, %) рассчитывали согласно ГОСТ 25100-2020 [32]:

$$K_{ТП} = \frac{S_{ТР}}{S_{ИЗМ}} 100, \quad (5.10)$$

то есть под трещинной пустотности понимается отношение суммарной площади трещин $S_{ТР}$ к площади измерений $S_{ИЗМ}$.

Под модулем трещиноватости понимается число трещин, приходящееся на единицу длины нормали к плоскостям этих трещин. Густота трещин измеряется в 1/м и вычисляется по формуле:

$$M = \frac{\Delta n}{\Delta L}, \quad (5.11)$$

где Δn – число трещин, пересекающих линию длиной ΔL , перпендикулярную к направлению их простирания.

На основании полученных материалов все результаты были объединены в группы по степени трещиноватости согласно ГОСТ 25100–2020 [32].

Результаты исследований представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Значения трещиноватости массива структурного элювия (зона В)

Степень трещиноватости	Количество площадок трещиноватости, шт	Средние значения R_c , МПа	Модуль трещиноватости, М, %	Коэффициент трещинной пустотности, $K_{ТП}$, %	Ширина раскрытия трещин, t, мм
Очень слаботрещиноватые	39	80÷120	<1.5	0.0÷0.09	0.01÷0.48
Слаботрещиноватые	51	50÷80	1.5÷5	0.1÷0.5	0.1÷1.0
Средне-трещиноватые	55	10÷50	5÷10	0.6÷2.1	0.5÷2.5
Сильнотрещиноватые	37	<10	10÷30	2.2÷3.5	0.5÷4.5

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

По результатам изучения физико-механических свойств в разрезах карбонатных массивов отмечается, что снизу вверх, по мере увеличения интенсивности трещиноватости, происходит последовательное ухудшение

механических свойств пород. Прочные ($R_c=50-120$ МПа) карбонатные породы переходят сначала в группу скальных пород средней прочности ($R_c=10-50$ МПа), а затем в группу скальных малопрочных грунтов ($R_c \leq 10$ МПа).

По результатам расчетного метода впервые была построена карта степени неоднородности элювиальных грунтов в программной среде ArcMap 10.8. В качестве исходных материалов были использованы данные лабораторных исследований. Построенная карта представлена на рисунке 5.9.

Анализ распространенности степени трещиноватости массива элювиальных отложений показал, что в пределах всей территории Бугульминского плато отмечается увеличение интенсивности трещиноватости на эрозионно-аккумулятивных нижних, средних частях склонов и приводораздельных частях вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участки характеризуются сильнотрещиноватыми и среднетрещиноватыми породами структурного элювия. Данное формирование связано с формированием речных долин на приводораздельных частях; периодическими смещениями русла речных долин, способствующих размыву ранее накопленных элювиальных толщ;

Наименьшая трещиноватость развита на эрозионно-денудационных водоразделах с наивысшими абсолютными отметками поверхности, в междуречьях рек Шешма и Степной Зай, рек Степной Зай и Мелля, рек Степной Зай, Ик и Дымка, рек Дымка Ик и Киндыз. Территория характеризуется очень слаботрещиноватыми и слаботрещиноватыми породами структурного элювия. Данное формирование наблюдается на плоских вершинах Бугульминской возвышенности, где речная сеть начинает формироваться.

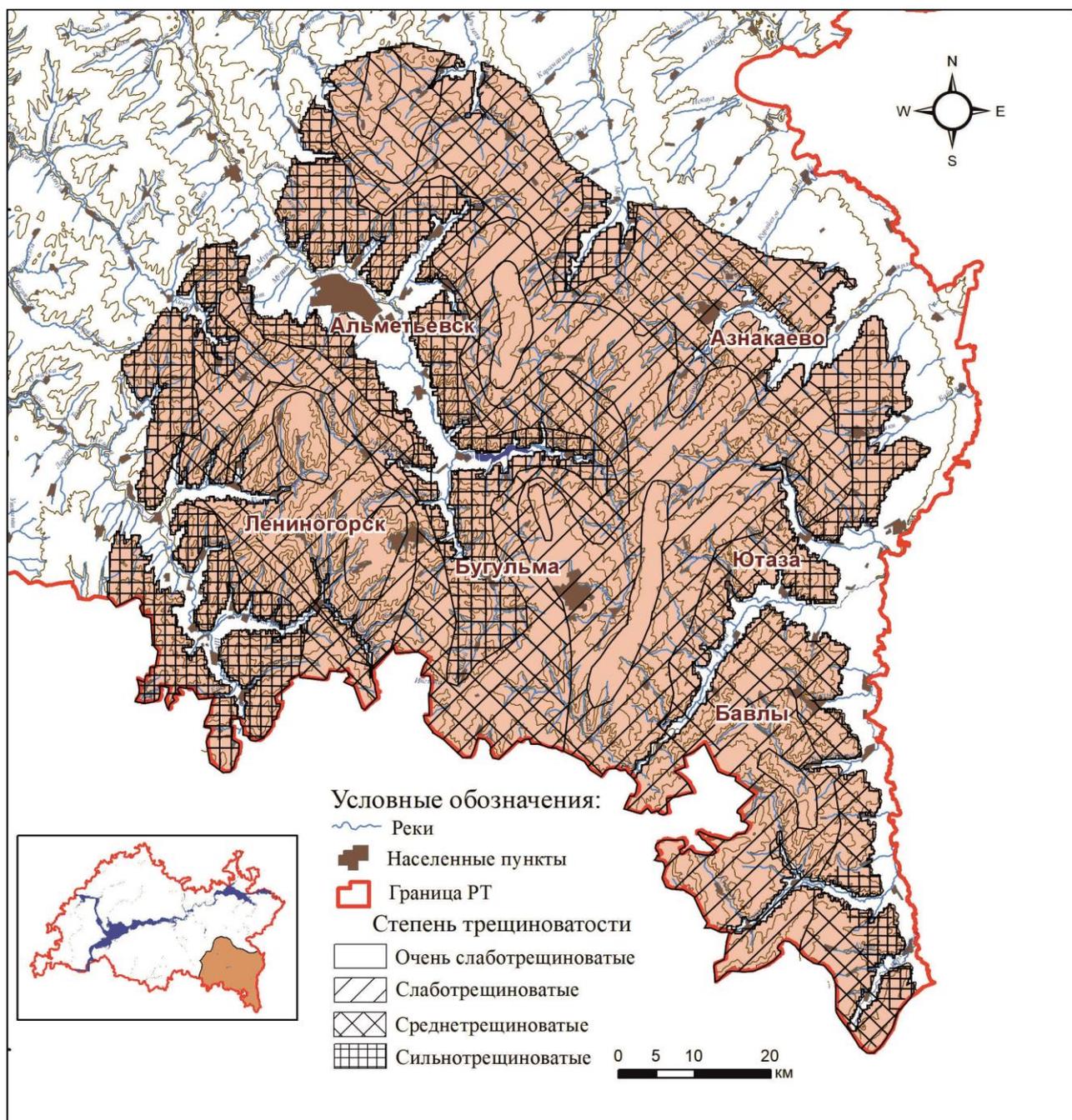


Рис. 5.9 Карта степени трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия

5.3 Экспериментальные исследования развития процесса суффозии

Недостатком расчетного способа является то, что в реальных условиях процесс суффозии может иметь быстро затухающий характер.

Согласно В.Д. Ломтадзе [69] механическая суффозия может развиваться, если будут соблюдены три условия: 1) порода, через которую осуществляется фильтрация воды, должна обладать определенной неоднородностью; 2) скорость фильтрации воды должна превышать определенную критическую величину; 3) должна существовать область разгрузки этой породы от мелких частиц.

Первое условие определяется структурно-текстурными особенностями пород. Карбонатно-глинистая мука, характеризуется рыхлым сложением, где присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала [66]. На исследуемой территории коэффициент неоднородности достигает значения $C_u < 30$.

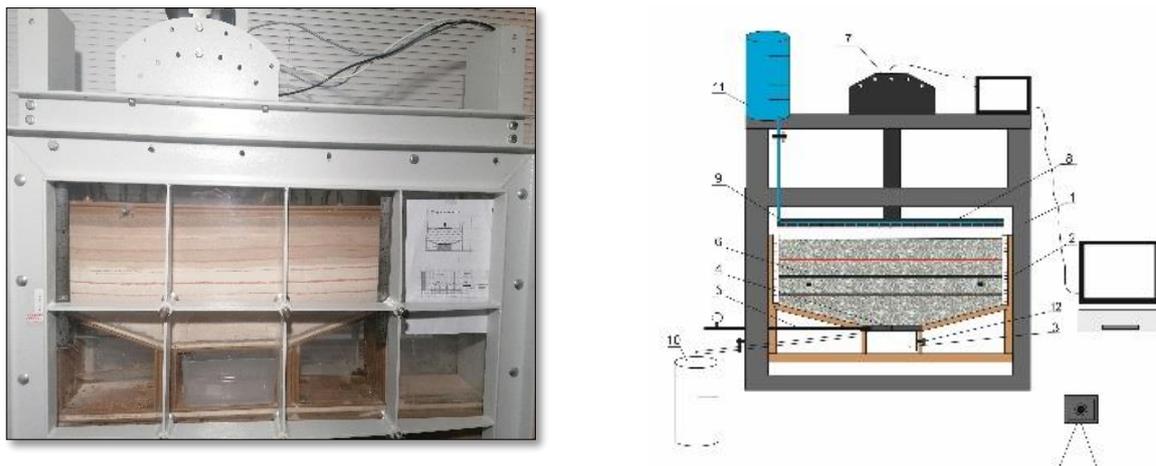
Второе условие характеризует движущую силу этого процесса: частицы заполнителя могут начать перемещение между частицами скелета суффозионного грунта только тогда, когда скорость фильтрации через него воды достигнет некоторой величины [24]. Градиент фильтрации в образцах суффозионного грунта подобран так, чтобы заполнитель приходил в движение при значениях, измеряемых десятками долями единицы, при этом в приборе фиксируется увеличение водопроницаемости образца как результат прогрессирующего выноса заполнителя [134].

Третье условие требует существования возможности транспортировки частиц заполнителя в трещины, которые сообщаются с полостью, способной принять достаточный объем перемещенных частиц.

Моделирование процесса суффозии на трещиноватом скальном массиве было проведено в экспериментальном лотке, в нижней части которого имеется раздвижная полая щель с возможностью плавного изменения ширины ее раскрытия в процессе эксперимента без прерывания процесса фильтрации.

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 суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования»)

[68,96], показанной на рисунке 5.10.



А

Б

Рис. 5.10. Внешний вид (А) и схема (Б) устройства для определения суффозионной устойчивости грунтов:

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

Отличием установки от аналогичных является то, что моделирование процесса суффозии 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. Управление нагружением вертикальной сжимающей нагрузкой, измерение деформаций осуществляется с помощью системы АСИС конструкции Научно-производственного предприятия «Геотек». Прозрачные стенки камеры позволяют визуально наблюдать характер протекания процесса суффозии. Момент начала суффозионного выноса грунта, его остановка вследствие процессов коагуляции и дальнейшее возобновление при достижении критического размера ширины раскрытия щели дополнительно контролируются в автоматическом режиме с помощью проточного датчика мутности. Возможность создания вертикальной сжимающей нагрузки позволяет оценивать протекание процесса суффозии как в условиях природного напряженного состояния, так и при прогнозном нагружении.

Методика эксперимента заключалась в следующем: для испытаний взяты

образцы карбонатно-глинистой муки бесструктурного элювия - 15 разновидностей по гранулометрическому составу, которые были выделены ранее.

Исследуемый грунт укладывали в суффозионный лоток отдельными слоями с включением цветных полосок, подвергая его легкому уплотнению, затем на поверхность уложенного исследуемого грунта подсыпали пригрузочный слой для более равномерного распределения расхода воды, втекающей в верхний отсек суффозионного лотка.

Далее исследуемый грунт подвергли уплотнению штампом при помощи электромеханического вертикального нагрузочного устройства, фиксируя при этом показания усилий и деформаций с помощью блока управления и регистрации сигналов. Время условной стабилизации составил 1 ч.

Затем проводили водонасыщение образца капельным поливом через штамп сверху вниз до полного водонасыщения. Электромеханическим вертикальным нагрузочным устройством создавали требуемую (природную) нагрузку на исследуемый грунт. Природное давление рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \gamma \times h, \quad (5.10)$$

где γ - удельный вес грунта кН/м^3 , h – мощность слоя, м

Затем водой из напорного бака создавали фильтрационный поток на поверхность штампа с капельным поливом. Градиент фильтрации в образцах суффозионного грунта подбирался так, чтобы заполнитель приходил в движение при значениях, измеряемых десятками долями единицы, при этом в приборе фиксировалось увеличение водопроницаемости образца как результат прогрессирующего выноса заполнителя.

Профильтрованная вода стекала в раздвижную полую щель, оборудованную винтовым устройством и регулятором раскрытия щели, при этом в процессе эксперимента осуществлялась плавное увеличение раскрытия щели до появления устойчивого суффозионного выноса частиц грунта в прозрачный грунтосборник.

Отслеживание количества вынесенных из суффозионного лотка суффозионных частиц осуществлялось в режиме реального времени проточным датчиком мутности и цветности. Значение мутности пробы определяли с использованием градуировочной характеристики прибора. Мутность выражается в формалиновых единицах (ЕМФ).

В конце эксперимента из суффозионного лотка отбирали образцы грунта для конечного определения влажности, температуры, плотности.

Осредненные данные по эксперименту представлены в таблице 5.4.

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.

Таблица 5.4 – Данные по эксперименту для бесструктурного элювия (Зона А)

C_u	ρ , г/см ³	n, %	γ , кН/м ³	σ , кПа	K_f , м/сут	t_0 , мм	t_{cr} , мм
0.0-2.0	1.6	42	15.7	6	0.2	0.1	0.4
2.0-4.0	1.6	39	15.7	6	0.2	0.1	0.4
4.0-6.0	1.67	38	15.7	6	0.2	0.2	0.4
6.0-8.0	1.7	36	16.6	6	0.2	0.2	0.4
8.0-10.0	1.7	35	16.6	6	0.5	0.4	1.0
10.0-12.0	1.7	35	16.6	6	0.5	0.5	1.1
12.0-14.0	1.7	34	16.6	6	0.5	0.5	1.2
14.0-16.0	1.8	34	17.6	7	0.5	0.6	1.4
16.0-18.0	1.8	33	17.6	7	0.7	0.7	1.3
18.0-20.0	1.8	32	17.6	7	0.7	0.9	1.4
20.0-22.0	1.8	32	17.6	7	0.7	0.9	2.0
22.0-24.0	1.8	31	17.6	7	1.0	1.1	2.1
24.0-26.0	1.8	31	17.6	7	1.0	1.2	2.0
26.0-28.0	1.9	31	18.6	7	1.0	1.5	2.2
28.0-30.0	1.9	31	18.6	7	1.0	1.5	2.4

В таблице 5.5 приведены осредненные результаты обработки расчетного метода и экспериментального. Видно, что условие $\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N$, 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.

Таблица 5.5 Общая сводка результатов суффозионности 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 , мм	d ₁₀ .мм	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

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. Для таких грунтов, по всей видимости, суффозионность должна оцениваться по отличным от предлагаемых в существующих методиках формулам.

5.4 Интегральная оценка суффозионной опасности территории

Для интегральной оценки риска суффозионной опасности провели анализ каждого изученного фактора влияющего на развитие суффозии на изучаемой территории.

Для построения карт в программной среде ArcMap 10.8 были использованы материалы полевого картирования, цифровая модель рельефа (ЦМР) - модель высот SRTM с сайта USGS Earthexplorer; векторные карты топографическая и геологическая (масштаб 1:200000), созданные на кафедре геофизики и геоинформационных технологий; карта четвертичных образований лист N39 из фондов Всероссийского научно-исследовательского геологического института (ВСЕГЕИ) им. А.П.Карпинского.

На основании объединенных данных полевых и лабораторных исследований, выполненных расчетов и результатов моделирования были построены серии карт (растровые изображения) представленные на рисунке 5.11– 5.16:

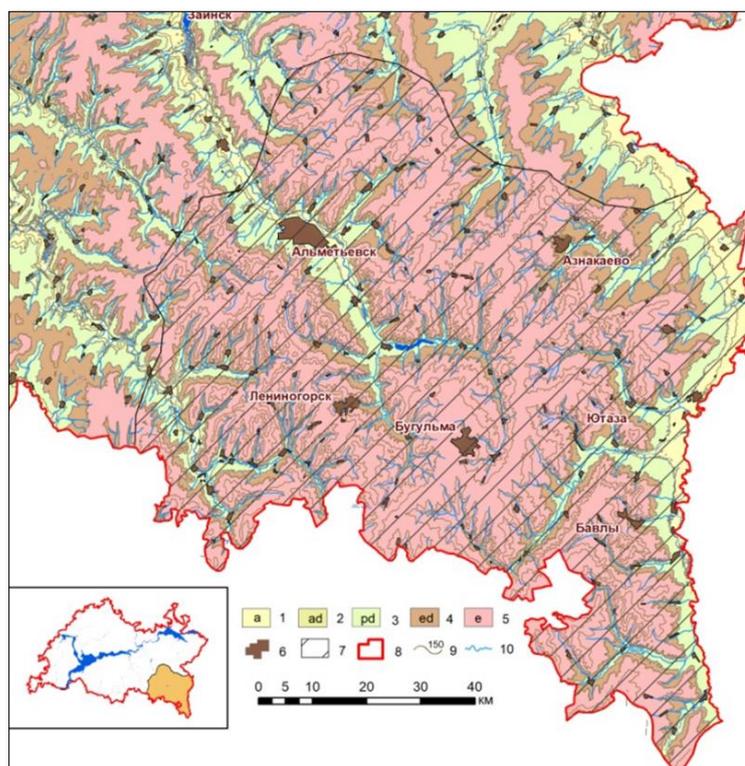


Рис. 5.11. Карта четвертичных отложений территории Бугульминского плато

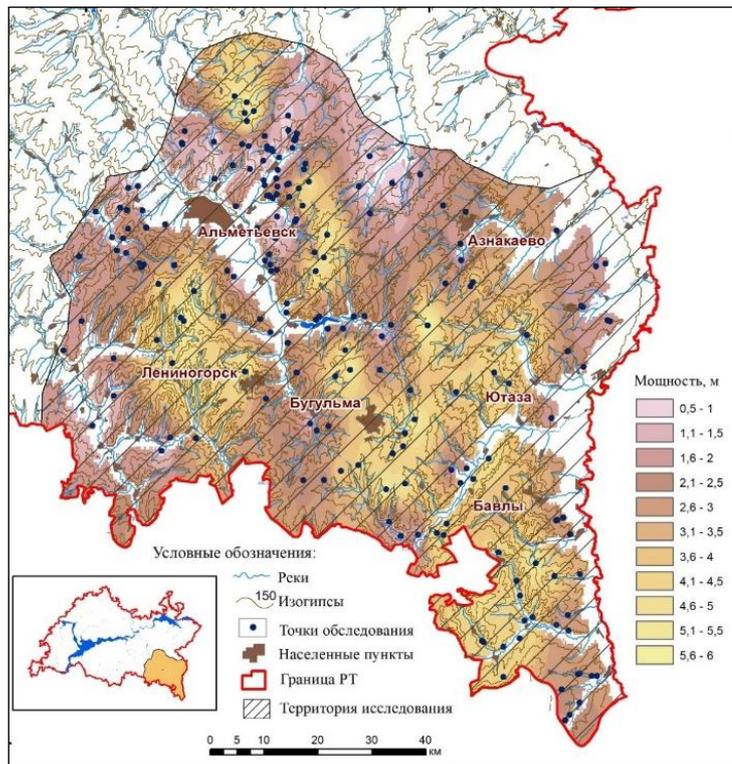


Рис. 5.12 Карта распространения мощности карбонатного элювия

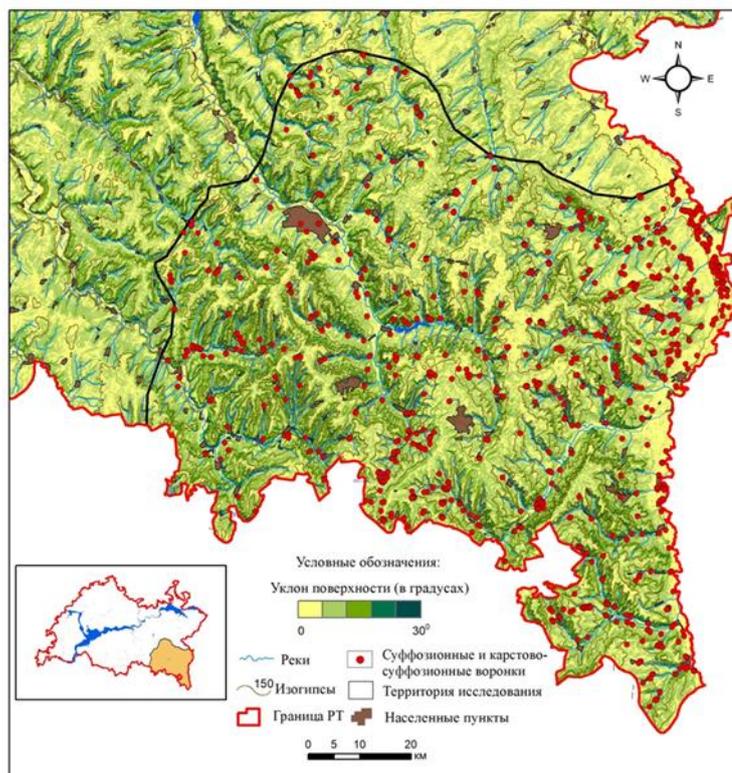


Рис. 5.13 Карта уклона поверхности с распространением карстово-суффозионных воронок на территории Бугульминского плато

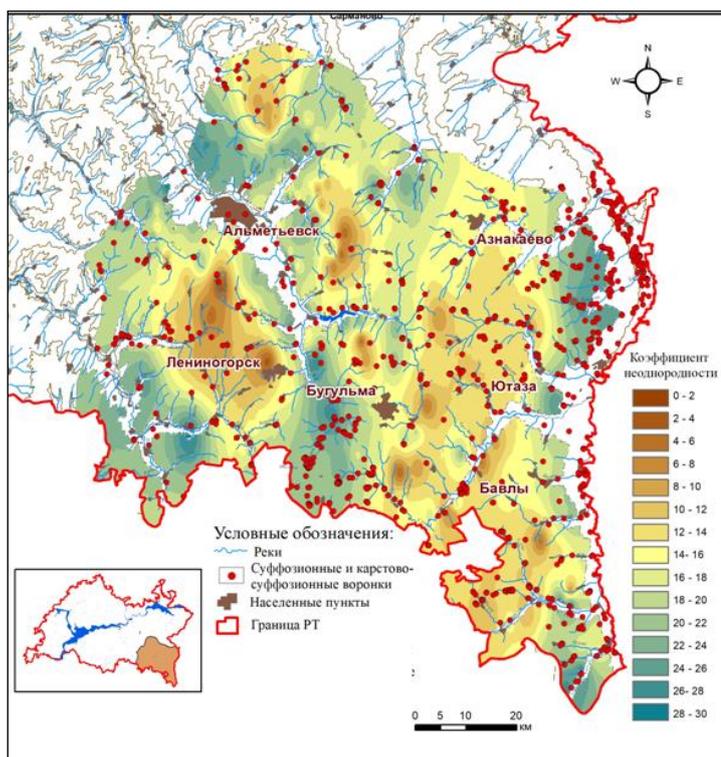


Рис.5.14 Карта неоднородности грунта бесструктурного элювия с распространением суффозионных и карстово-суффозионных форм

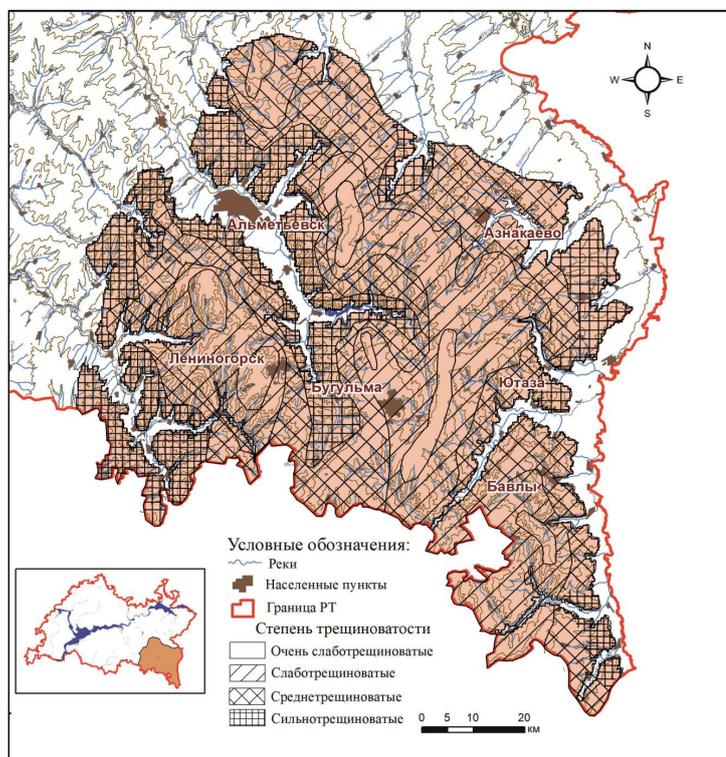


Рис.5.15 Карта степени трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия

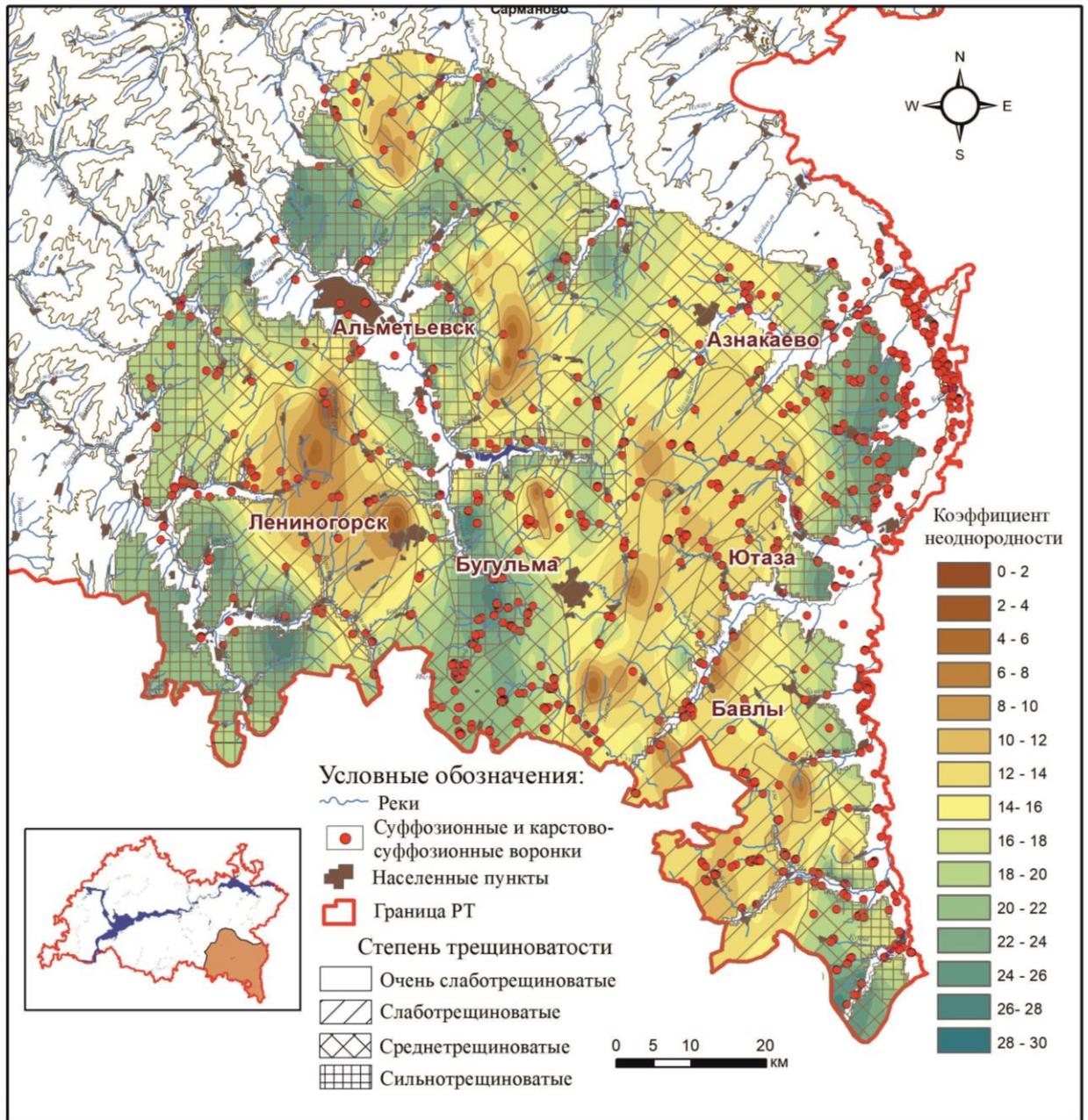


Рис. 5.16 Карта совместных факторов проявления суффозии на территории Бугульминского плато

Растровые изображения, пространственно и геометрически совпадают с изучаемой площадью. Для анализа пространственного распределения данных в ArcGis использовалась интерполяция по методу обратно взвешенных расстояний (овр) в модуле «Spatial Analyst».

Для создания растрового покрытия интегральной карты необходимо суммировать полигональный слой опасности проявления каждого фактора: растровое изображение суффозионной неустойчивости грунта, степени трещиноватости с

полигональным слоем площади изучаемой территории. При этом в каждом растровом изображении выделили классы «опасных» факторов в виде баллов.

Таблица 5.5 – Распределение факторов проявления суффозии в виде баллов

Баллы/ Фактор	Суффозийность грунта (C_u)	Степень трещиноватости массива
1	$C_u < 8$ несуффозийный	Очень слаботрещиноватые 0,0-0,09
2	$C_u = 10-16$ переходные	Слаботрещиноватые 0,1-0,5
3	$C_u > 16$ суффозийным	Средне-трещиноватые 0,6-2,1
4		Сильнотрещиноватые 2,2-3,5

Итогом стало полученное растровое покрытие территории со значениями балльного коэффициента. Для каждого фактора балльный коэффициент суммировался с совпадающими по площади расположению, используя картографическо-математические алгоритмы сложения растровых изображений. Границы классов определялись таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами. В балльном подходе использовали применение «взвешенных» баллов с учетом весового фактора.

Таким образом, суммарный растр является визуальным отображением результата интегральной оценки суффозийной опасности территории Бугульминского плато.

На территории можно выделить 4 класса интегрального риска по значениям балльной оценки:

- ✓ 1.Первый класс – территории, с низким уровнем интегрального риска, обуславливающие возникновение суффозии 0-2;
- ✓ Второй класс – территории со средним уровнем интегрального риска, значения от 2 – 4 балла;
- ✓ 3.Третий класс – территории с высоким уровнем интегрального риска, значения от 4 до 5 баллов;

- ✓ 4. Четвертый класс – территории с очень высоким уровнем интегрального риска, значения свыше 5-7 баллов

Результатом пространственного совмещения и суммирования баллов по каждому классу с учетом веса каждого показателя, является итоговая интегральная карта суффозионной опасности, включающая следующие степени опасности представленная на рисунке 5.17.

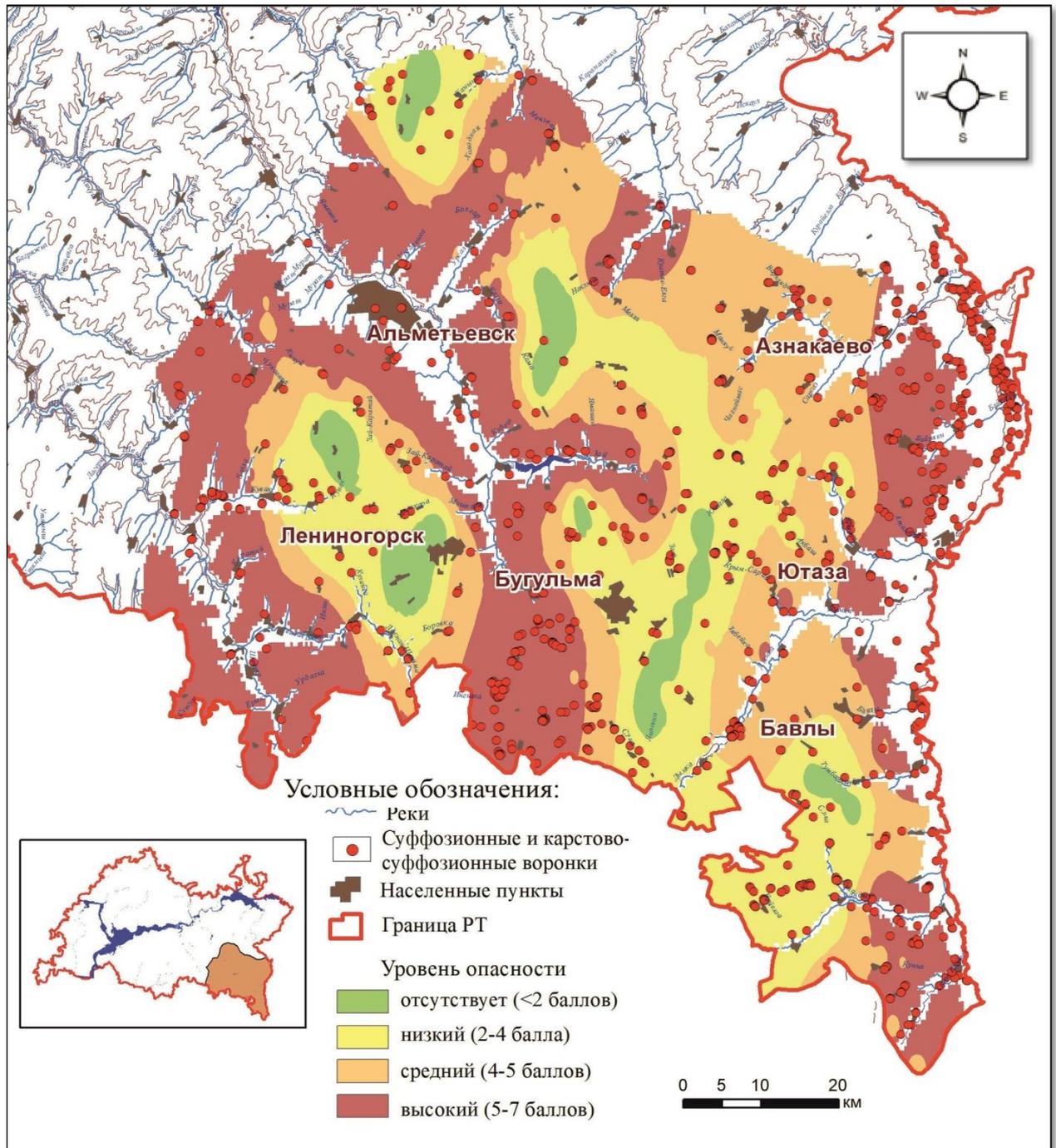


Рис.5.17. Интегральная карта суффозионной опасности

Анализ карты показывает, что на изучаемой территории порядка 10% площади с низким уровнем интегрального риска и является наиболее благоприятной для строительства 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 суффозионной опасности территории производилась путем пространственного анализа данных о распространении карстово-суффозионных форм на изучаемой территории. По полевому обследованию общее количество зафиксированных суффозионных и карстово-суффозионных воронок составляет 1151 штук. Пространственно и геометрически совпадают с изучаемой площадью 882 штук. Результат пространственного анализа выражен в статистическом распределении поверхностных карстово-суффозионных форм по выделенным классам опасности, представленные в таблице 5.6.

Таблица 5.6. – Распределение плотности значений карстово-суффозионных форм по классам опасности

Баллы	Класс опасности	Количество карстово-суффозионных форм
0-2	Первый класс	4
2-4	Второй класс	130
4-5	Третий класс	320
5-7	Четвертый класс	428

Анализируя полученные результаты интегральной карты, можно отметить, что большая часть карстово-суффозионных форм преимущественно относится к участкам 4 и 3 класса опасности. Общее количество воронок 748 шт, что составляет 84%. Наименьшее количество карстово-суффозионных форм (130 шт.) развито на территории со средним уровнем интегрального риска (2 класс) и составляет 15% и с низким уровнем (1 класс) опасности 0,5% от общего числа воронок.

Построенная карта может быть использована в целях районирования территории по суффозионной опасности.

Анализ полученных всех карт позволил сделать геолого-геоморфологическую типизацию территории с последующей инженерно-геологической характеристикой и оценкой суффозионной опасности:

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). Террасы аккумулятивные, подошва аллювия в долинах крупных и средних рек находится на 5,0–13 м ниже меженных урезом рек, а кровля возвышается над ними на 8,0–12 м. 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. Распределение провалов на террасах рек неравномерное. Воронки здесь имеют преимущественно конический или провальный профиль ($d=15,0–120$ м), местами образуют линейно-вытянутые цепочки воронок. 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 ($d=50–120$ м). Уклон поверхности составляет 1–3°. Средняя плотность воронок составляет 0,22 шт/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к умеренно опасной (по методике Рагозина А.Л (2003 г.)). Пораженность территории провалами – 1,3 м²/км². На территории отсутствуют элювиальные карбонатные породы, в результате переуглубление долин и смыва отложений.

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. Оседания имеют форму блюдец или воронок ($d=3,0-15$ м), реже можно встретить провальные воронки ($d=20,0-25,0$ м). Дно воронок чаще сухое, реже заболочено или приурочены к небольшим озерам. Уклон поверхности составляет $3-6^\circ$. Плотность воронок – $0,1$ шт/км². Пораженность территории провалами – $0,65$ м²/км². Территория по 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 сильно-трещиноватым.

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 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 ($d=1,3-5,0$ м). Дно воронок чаще сухое. Уклон поверхности составляет $6-10^\circ$. Плотность воронок – $0,11$ шт/км². Пораженность территории провалами – $0,66$ м²/км². Территория по суффозионной опасности относится к мало опасной (по методике Рагозина А.Л (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 сильно-трещиноватым.

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 220 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 ($d=1,3-10,0$ м). Уклон поверхности составляет $10-28^\circ$. Плотность воронок – $0,06$ шт/км². Пораженность территории провалами – $0,65$ м²/км². Территория по 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. 280–370 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 ($d=1,3-8,0$ м). Уклон поверхности составляет $0-3^\circ$. 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.

ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ

1. В рамках выполненных исследований, было подтверждено, что суффозионные процессы в дифференцированных профилях молодых кор выветривания развиваются при сочетании следующих факторов: особенностей сложения, неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.
2. На основании результатов выполненных расчетов было установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми. Суффозионная устойчивость структурного элювия в значительной степени зависит от трещиноватости массива.
3. По результатам интегральной оценки суффозионной опасности, можно отметить, что на изучаемой территории порядка 10% площади относится к низкому уровню интегрального риска, 19% территории подвержено среднему интегральному риску, 38% и 33 % территории подвержено высокому и очень высокому интегральному риску. Верификация полученной интегральной модели хорошо согласуется с прямыми наземными наблюдениями, а также внутренней непротиворечивостью сделанных выводов и их согласованностью. Тем самым можно отметить, что большая часть карстово-суффозионных форм преимущественно относится к участкам 4 и 3 класса опасности. Общее количество воронок 748 шт, что составляет 84%. Наименьшее количество карстово-суффозионных форм (130 шт.) развито на территории со средним уровнем интегрального риска (2 класс) и составляет 15% и с низким уровнем (1 класс) опасности 0,5%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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.

Общая мощность элювиальных отложений на территории Бугульминского плато составляет от 4,0 до 6,0 м. На склонах останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала, мощность элювиального покрова составляет от 1,5 до 4,1. Данные участки характеризуется повышенной мощностью слоя бесструктурного элювия и более пониженной мощностью слоя структурного элювия. В пределах речных долин эрозионно-аккумулятивных поверхностях нижней части склонов развиты наиболее маломощные покровные элювиальные отложения. Преимущественно отложения представлены бесструктурным горизонтом с мощностью до 1,5 м.

2. Выявлено, что на выположенных водоразделах Бугульминского плато широко развиты карбонатные молодые коры выветривания, в которых хорошо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, горизонт сохранного массива 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 сопротивляемость 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 распространением суффозионных и карстово-суффозионных воронок.

5. В рамках выполненных полевых, лабораторных и аналитических исследований, было подтверждено, что суффозионные процессы в дифференцированных профилях молодых кор выветривания развиваются при сочетании следующих факторов: особенностей сложения, неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.

6. На основании результатов выполненных расчетов было установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми. Суффозионная устойчивость структурного элювия в значительной степени зависит от трещиноватости массива.

7. Для оценки возможности развития суффозионных процессов в дифференцированных профилях молодых кор выветривания предложена интегральная оценка, основанная на результатах неоднородности грунта бесструктурного элювия и параметров степени трещиноватости структурного элювия.

По результатам интегральной оценки суффозионной опасности, можно отметить, что на изучаемой территории порядка 10% площади относится к низкому уровню интегрального риска, 19% территории подвержено среднему интегральному риску, 38% и 33 % территории подвержено высокому и очень высокому интегральному риску. Верификация полученной интегральной модели хорошо согласуется с прямыми наземными наблюдениями, а также внутренней непротиворечивостью сделанных выводов и их согласованностью. Тем самым можно отметить, что большая часть карстово-суффозионных форм преимущественно относится к участкам 4 и 3 класса опасности. Общее количество воронок 748 шт., что составляет 84%. Наименьшее количество карстово-суффозионных форм (130 шт.) развито на территории со средним уровнем интегрального риска (2 класс) и составляет 15% и с низким уровнем (1 класс) опасности 0,5%.

8. Выполненные исследования позволили 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов Р.Ф. Карст Бугульмино-Белебеевской возвышенности и условия гидротехнического строительства // Вопросы геологии и геоморфологии Южного Урала и Предуралья.– Уфа: БНЦ УрО АН СССР.,1981. – С. 81–85.
2. Аверьянов В.И., Блудорова Е.А., Фомичева Н.Л., Ясонов П.Г. Казанское Поволжье и Прикамье // Плиоцен и плейстоцен Волго-Уральской области.– М.: Наука., 1981. – С. 95 – 118.
3. Аникеев А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. –2006. – №6.– С.544–553.
4. Аникеев А.В. Чумаченко С.А. Карстово-суффозионные провалы Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Геоморфология. –2011. – №3.– С. 32–41.
5. Анисимов В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Влияние механической суффозии на дополнительные осадки оснований фундаментов / /Основания, фундаменты и механика грунтов.–2009. – №4. – С. 4–8.
6. Аникеев А.В. Калинин Э.В., Тараканов С.И. Определение напряженного состояния грунтовой толщи над карстовой полостью// Инженерная геология.– 1991.– №5.–С. 64–70.
7. Арешидзе Г.М, Джавахишвили Э.А. Изменение состава и физико-механических свойств горных пород при выветривании // Тезисы докладов III регионального совещания по инженерной геологии. Л.– 1966. – С. 296–301.
8. Барановский А.Г. Отечественный и мировой опыт изучения скальных и дисперсных элювиальных глинистых грунтов для инженерно-геологических целей //Инженерные изыскания.– 2015. – №12. – С. 34–41.
9. Бондарик, Г.К. Инженерная геодинамика: учебник / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – Москва: КДУ, 2009. – 440 с.
10. Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород.– М.: Недра., 1971. – 272 с.
11. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика.– М: КДУ., 2007. – 440 с.

12. Борейко Л.Г. Выделение в разрезе инженерно-геологических элементов на основе анализа изменчивости инженерно-геологических свойств исследуемых пород с помощью ЭВМ. // Инженерная геология.– 1982.– №3. – С. 82-91.
13. Бутаков Г.П. Неоплейстоцен и голоцен.– М.: ГЕОС., 2003. – 221 с.
14. Васильев Б.В. Карст на территории Татарской республики и его значение в сельском хозяйстве и промышленности // Гидрогеология и карстоведение.– Пермь: Изд-во Пермского университета.,1966.– Вып.3. – С. 97 -102.
15. Вишневский П.В., Антонов Ю.Б., Кузнецов Г.Е., Боровский М.Я. Основные геологические и гидрогеологические аспекты карстовых процессов и особенности их изучения геофизическими методами в Республике Татарстан // Гидрогеология и карстоведение. – Пермь: Изд-во Пермского университета., 2000. –Вып. 13. – С. 110-116.
16. Гараева А.Н. Особенности кольматации порового пространства заглинизированных нефтяных коллекторов // Нефтяное хозяйство.–2017. – №8.– С. 72-74. – DOI: 10.24887/0028-2448-2017-8-72-74. – УДК 622.279.031.011.43.
17. Гараева А.Н., Латыпов А.И. Инженерно-геологическая характеристика молодых кор выветривания эрозионно-денудационных останцев Бугульминского плато юго-востока Татарстана// 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.
18. Гараева А.Н., Латыпов А.И., Зарипова Д.Р. Особенности гипергенного преобразования карбонатно-терригенных пород Бугульминско-Белебеевской возвышенности //Геологические науки – 2021: Материалы Всерос. научно-практ. конф. (Саратов,2 - 3 декабря 2021 г.). – Саратов: Издательство «Техно-Декор», 2021. – С. 49-53.
19. Гараева А.Н., Латыпов А.И., Зарипова Д.Р. Элювиальные отложения эрозионно-денудационных останцев Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Сборник статей всероссийской молодёжной конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий». – Москва: Издательство «Перо»., 2021. – С. 16-20.

20. Гараева А.Н., Латыпов А.И., Королев Э.А. Особенности карстования карбонатных массивов Бугульминского плато Республики Татарстан // 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.
21. Гараева А. Н., Хабибуллин И. Р. Оценка трещиноватости массивов оснований сооружений Альметьевского района Республики Татарстан// 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.
22. Газизов М.С. Оценка устойчивости закарстованных пород в основании инженерных сооружений // Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна. Вып.8: Тр. Совещания в г.Горький. – М.:Транспорт.,1968. – С. 29-44.
23. Голубева Л.В. Карстово-спелеологическая станция заповедника «Предуралье» // Природа. –1949. – № 7.– С. 87—88.
24. Гинзбург И.И. Древняя кора выветривания Урала. ч. I и II. // Труды института геологических наук СССР.– 1946.– №80. – 150 с.
25. Головкинский Н.А. О послетретичных образованиях по Волге в ее среднем течении // Изв. Казанск. ун-та.–1865. – Т. 1.– С. 451 – 524.
26. Голодковская Г.А. О влиянии тектонических процессов на формирование инженерно-геологических свойств горных пород // В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения.– М.: Изд. МГУ., 1968. – С. 17-34.
27. Горькова И.М. Физико-химическая механика дисперсных грунтов как основа инженерно-геологического прогнозирования // Инженерная геология.– 1980. –№6. –С. 61-66 .
28. Горецкий Г. И. Аллювий великих антропогенных прарек Русской равнины.– М.: Наука., 1964. – 415 с.
29. Горецкий Г.И. Формирование долины р. Волги в раннем и среднем антропогене.– М.: Наука., 1966. – 412 с.
30. ГОСТ 12248-2020 Определение характеристик деформируемости методом

- компрессионного сжатия –Введ.01.06.2021.– М.: Стандартиформ, 2020.– 19 с.
31. ГОСТ 12536-2014 Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.–Введ.01.07.2015.– М.: Стандартиформ, 2019.–23 с.
32. ГОСТ 25100 2020. Грунты. Классификация. –Введ.01.01.2021.– М.: Стандартиформ, 2020.–41 с.
33. ГОСТ 70259-2022 Грунты. Методы определения морозостойкости крупнообломочных грунтов. – Введ.01.09.2022.– М.: Стандартиформ, 2022.–12 с.
34. ГОСТ 30416-2020 Лабораторные испытания. Общие положения.– Введ.01.09.2021.– М.: ФГБУ "РСТ", 2021.–18 с.
35. ГОСТ 5180-2015 Методы лабораторного определения физических характеристик.– Введ.01.04.2016. – М.: Стандартиформ, 2016.–23с.
36. Дедков А.П. Поверхности выравнивания Среднего Поволжья и Вятско-Камского края // Поверхности выравнивания и коры выветривания. – М.: Наука., 1976. – С. 153 – 155.
37. Дедков А.П., Мозжерин В.В. Новые данные о генезисе и возрасте нижнего плато Приволжской возвышенности // Геоморфология. –2000. –№1.– С. 56 – 61.
38. Дедков А.П., Мозжерин В.В. Эоплейстоцен // Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника.– М.: ГЕОС., 2003. – С. 242 – 248.
39. Дедков А.П., Мозжерин В.В. Эоплейстоцен и неоплейстоцен, нерасчлененные //Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника. –М.: ГЕОС., 2003. – С. 248 – 253.
40. Джавахишвили Э.А. Выветривание майкопских глинистых пород как один из факторов в развитии оползней вдоль Абхазского побережья Черного моря. // Тбилиси: Труды ЛГПИИ, ГПИ.–1967.–№3 – С. 295-304.
41. Димухаметов, Д.М. Суффозионные процессы на территории городов / Д.М. Димухаметов, Л.А. Новопоселенских, Н.С. Бахарева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 892-892.
42. Дробинина Е.В., Катаев В.Н. Физические свойства песчаных и супесчаных грунтов покровной толщи в интегральной оценке суффозионной опасности территории в районах развития карбонатного карста // Геоинформатика.–2017.–

№1.– С.21-31.

43. Дублянский В.Н., Клименко В.И., Михайлов А.Н. Ведущие факторы развития карста и балльная оценка его интенсивности // Инженерная геология. – 1990. –№ 2. – С. 52-58.

44. Дятлова В.К. и др. Эколого-гидрогеологическая съемка масштаба 1:200000 на юго-востоке Татарстана (листы N-39-X, XI, XII, XVI, XVII, XVIII), 1998.– Кн. 1.– 120 с.

(Фонд геологической информации РТ)

45. Елкин В.А. Первый вариант карты карстовой опасности Республики Татарстан // Современные вопросы геологии. Материалы Всероссийской конференции "2-е Яншинские чтения". –М.: Научный мир, 2002.– С. 371–374.

46. Елкин В.А. К методике региональной оценки карстовой опасности (на примере Республики Татарстан) // Материалы Всероссийской научной конференции "Геология, Геохимия, Геофизика на рубеже XX и XXI веков". Том 2.– М.: Связьпринт, 2002. – С. 263–264.

47. Жиленков В.Н. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость.– Л., ВНИИГ им. Веденеева, 1991.– 93с.

48. Золотарев Г.С. Современные задачи инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания // В кн.: Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания.– М.: Изд. МГУ.– 1971.– С. 4–25.

49. Кавеев М.С. Динамика образования карстовых провалов на примерах исследования в Среднем Поволжье // Известия АН СССР, сер. общ.– 1961.– Вып. 1.–С. 39–47.

50. Кавеев М.С., Васильев Б.В., Галиев У.З., Хабибуллина Ф.С. Общие закономерности развития экзогеодинамических явлений на территории Татарии // Известия КФАН СССР, сер. геол. наук.– 1954.– № 2.– С. 76– 93.

51. Кавеев М.С., Васильев Б.В., Галиев У.З., Хабибуллина Ф.С. Общие закономерности развития экзогеодинамических явлений на территории Татарии // Известия КФАН СССР, сер. геол. наук.– 1954. –№ 2. – С. 76– 93.

52. Катаев В.Н. Системный подход в анализе устойчивости карстовых массивов //

Вестник Пермского университета. Геологи. – Пермь: ПГУ. – 1994. – Вып. 3. – С. 127-144.

53. Катаев В.Н. Основы структурного карстования // Учеб. пособие по спецкурсу. – Пермь: ПГУ, 2004. – 143 с.

54. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М. Компьютерное картографирование и моделирование в целях прогнозной оценки карсоопасности // Сергеевские чтения, вып.11. – Москва: Изд-во ГЕОС.– 2009. –С.109-114.

55. Кажокина В.А., Куржанова А.А., Михайлов В.Н., Мозжерин В.В., Мозжерин В.И., Петрова Е.В., Туманов В.Р., Туманов Р.Р. «Составление цифровой карты четвертичных образований Республики Татарстан масштаба 1:200 000», 2003.–Кн. 1.– 108 с. (Фонд геологической информации РТ, ГУП «Геоцентр РТ»)

56. Казаринов В.П. Кора выветривания.– М. Недра, 1959 – 250 с.

57. Каштанов С.Г. Карстовые явления в районе Казанского Поволжья // ДАН СССР. 1943.– Т.40.– № 2. – С. 85–88.

58. Костарев В.П. О количественных показателях карста и их использовании при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий // Инж.-строит.изыскания.–М.,1979.–№31(53).–С.49-53.

59. Кожеватов Е.Д. Некоторые теоретические вопросы проблемы понятия "глубинный карст" // Методика изучения карста. Тезисы докладов.–Пермь,1985.– С. 18–19.

60. Коллектив авторов под редакцией Трофимова В.Т., Грунтоведение. 6-ое издание,. –изд. МГУ, 2005 – 1024 с.

61. Коломенский Е.Н. О возможности использования теории вероятностей для решения некоторых задач инженерной геологии. –М.: Вест. Моск. ун-та, сер. геол., 1968–№ 2.– С. 85–90.

62. Коломенский Н.В. Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород в инженерно-геологических целях.– М.: Госгеолиздат, 1952. – 68 с.

63. Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований.– М.: Недра, 1968. – 342 с.

64. Конне А.М. Строение, состав и свойства латеритные коры выветривания

региона Димбокро (Кот д'Ивуар).// Изв. вузов. Геология и разведка.– 2012. –№1. – С. 49 – 55.

65. Кухарев Н.М. Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства. –М.:Стройиздат,1975. – 168 с.

66. Латыпов А.И., Гараева А.Н., Королев Э.А. Карбонатные элювиальные грунты Бугульминско-Белебеевской возвышенности // 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.– С.78-84.

67. Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лунева О.В Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности// Регулярный научный журнал Охотинского общества грунтоведов «Грунтоведение».-2022.- №1(18). -С.31-43.

68. Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лунева О.В, Королев Э.А. Интегральная оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Геоэкология –2022.– №4. – С.37–46.

69. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика: учебник для вузов по специальности «Гидрогеология и инженерная геология». – Ленинград: Недра, 1971. – 478 с.

70. Мазарович А.Н. Из области геоморфологии и истории рельефа Нижнего Поволжья // Землеведение, т. 29, вып. 3 – 4.– 1927. – С. 21 – 42.

71. Мазарович А.Н. Стратиграфия четвертичных отложений Среднего Поволжья // Тр. комис. по изуч. четвер. пер., т. 4, вып. 2.–1935. – С. 91 – 118.

72. Макеев В.М. Карта новейшей тектонической структуры территории Республики Татарстан. Масштаб 1:500 000. –М.: ИГЭ РАН, 2001.–66 с.

73. Макрыгина В. А. Геохимия переотложенных и непереотложенных древних кор выветривания, Прибайкалье // Геохимия.– 2010–N8.–С.815-828.

74. Максютлова К.М. "Отчет о результатах разведки Аверьяновского месторождения известняков, Аверьяновского и Мало-Бугульминского месторождений песков". КГЭ, Казань, 1968. – 126 с. Фонды ТГРУ.

75. Малышева О.Н., Дедков А.П. О «миндельском» аллювии в центральной части Среднего Поволжья // Материалы по геологии востока Русской платформы. Вып. 3.– Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. – С. 3 – 29.
76. Марамчин С.А., Руднев М.Л., Семакин Ю.Г., Соловьева Е.А., Уланов Е.Е. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка. Казань, 1997. – 185 с. Фонды ТГРУ
77. Маричев В.П. Взаимосвязь инженерно-геологических свойств элювиальных глинистых грунтов. // В сб.: Гидрогеология и инженерная геология Урала, вып. 1, Свердловск, 1976. – С. 69–75.
78. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов : учебник для вузов // Н.Н. Маслов.– М. : Высшая школа, 1982. – 511 с.
79. Матвеев Ю.Д. К методике изучения выветрелых пород в инженерно-геологических целях. // В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. –М.: Изд. МГУ, 1968.– С. 35- 48.
80. Медведева Н.П. и др. Записка к изданию государственной гидрогеологической карты м-ба 1:200000 листов N-39-IV,N-39-V,N-39-VI.,2013.–171 с. Фонды ГО "Волгагеология".
81. Милановский Е.В. Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья.– М., 1940. – 88 с.
82. Милановский Е.В. Плиоценовые и четвертичные отложения Сызранского района // Тр. комис. по изуч. четвертич. периода, т. 4, вып. 2, 1935. – С. 175 – 221.
83. Мирчинк Г.Ф. Результаты работ Волжской экспедиции Академии наук СССР // Тр. комис. по изуч. четвертич. периода, т. 3, вып. 2, 1932. – С. 215 – 218.
84. Можжерин В.В. Аналогии сыртовых глин на севере Приволжской возвышенности // Изв. вузов, сер. геол. и разв., № 1, 2000. – С. 28 – 39.
85. Мочалов А.М., Кагермазова С.В., Гребенщикова Г.А. Учет влияния трещиноватости скальных и полускальных пород на прочность массива при оценке устойчивости бортов карьеров по данным разведки // Записки горного института.– 2011.– Т. 190. – С. 304-309.
86. Мурчисон Р.И. и др. Геологическое описание Европейской России и хребта Уральского. Ч. 1 – 2. –СПб, 1849. – С. 3 – 29.

87. Мусин А.Г. Карст Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Дисс. на соискание ученой степени кандидата географических наук. Казань, 1966. – 140 с.
88. Николаев Н.И. Плиоценовые и четвертичные отложения сыртовой части Заволжья // Тр. комис. по изуч. четв. пер., т. 4, вып. 2, 1935. –С. 119 – 174.
89. Нецеткин О.Б. Особенности разрушений песчано-глинистых пород при образовании карстовых провалов // Инженерная геология карста: Докл. междунар. симп. Пермь: Изд-во ПГУ, 1993. –Т.1. –С.73–78.
90. Ноинский М.Э. Геологическое строение и полезные ископаемые Республики Татарстан // Географическое описание Тат. Респ., ч. 1. Казань, 1921. – С. 13 – 57.
91. В.И. Осипов, В.М. Кутепов и др. Опасные экзогенные процессы. Под ред. В.И. Осипова. – М.: ГЕОС, 1999. – 290 с.
92. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение.– 2013.– №2. – С.3-34.
93. П 49-90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. ВНИИ гидротехники им. Б. Е. Веденеева. - Л.: ВНИИГ, 1991. – 91 с.
94. П 56-90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВНИИ гидротехники им. Б. Е. Веденеева. - Л.: ВНИИГ, 1992. – 110 с.
95. П 55-76 (ВНИИГ). Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов .ВНИИ гидротехники им. Б. Е. Веденеева. - Л.: ВНИИГ, 1977 – 171 с.
96. Петров В.П. Мониторинг объектов риска. Проблемы управления безопасностью и риском при техногенных воздействиях на территории Татарстана // Мониторинг.– 1997.– № 1.– С. 8–14.
97. Пендин Г, Бондарик В, Ярг Л. Инженерная геодинамика. Москва, 2007. – 440 с.
98. Печеркин А.И., Болотов Г.Б. Геодинамика рельефа карстующихся массивов.– Пермь: Изд-во Пермского университета, 1983. – 84 с.
99. ПНИИС. Рекомендаций по оценке инженерно-геологических свойств элювия карбонатных грунтов и учету их изменения при строительстве.–М.:Стройиздат, 1986.

-32 с.

100. Польшванов Б.Б. Кора выветривания. Процессы выветривания.– М.: АН СССР, 1934. – 45 с.

101. Попов И.В. Инженерная геология.– М.: Изд-во МГУ, 1959.– 510 с.

102. Полянин В.А. Литологические исследования четвертичных отложений долин Волги и Камы на территории Татарии // Учен. зап. Казанск. ун-та, т. 117, кн. 4, 1957. – С. 13 – 212.

103. Рагозин А.Л. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. –2003.– № 4. – С. 33-52.

104. Разумова В.Н. Коры выветривания латеритного и каолитового типа основных пород. Труды ГИН АН СССР., вып.174., 1977.– 252 с.

105. Разумова В.Н., Херасков Н.П., Черняховский А.Г. Геологические типы кор выветривания и примеры их распространения на Южном Урале.– М.: Изд-во АН СССР, 1963.– 139 с.

106. Саваренский Ф. П. Инженерная геология. –М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – 443 с.

107. Сагдудинов И.А. Поиски и поисково-оценочные работы на карбонатные породы для известкования почв в Бугульминском районе. Приволжская ГРЭ ТРГГП "Татарстангеология", Казань, 1996.–120 с.

(ФГИ РТ, АООТ "Татагрохимсервис", ТРГГП "Татарстангеология").

108. Сапожников Д.Г. О структурно-тектонической приуроченности древних кор выветривания. 1968. - В кн.: Кора выветривания, вып. 10.– М., "Наука",1968. – 136 с.

109. Селивановский Б.В., Каштанов С.Г. О карстовых процессах и карстовых формах рельефа в Среднем Поволжье. // Региональное карстоведение.– М.: Изд-во АН СССР, 1961.– С. 55-61.

110. Сергеев Е.В. Общее грунтоведение.– М.: Изд. МГУ, 1952. – 383 с.

111. Сергеев Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы. Под ред. акад. Е. М. Сергеева. – М.: Недра, 1986. – 254 с.

112. Середин, В.В., Сысолятин, С.Г., Вагин, А.Л., Хрулев, А.С. Влияние напряженного состояния грунтов на модуль деформации // Инженерная геология. –

2015. – № 2. – С. 12-16.

113. Селивановский Б.В. Современный карст Среднего Поволжья // Учен.записки КГУ.сер.Геология.– 1952.– Т.112.– Кн.–8.–С.100-118.

114. СНиП 2.02.01.83 - Основания зданий и сооружений.– Введ.01.01.1985. – М.: ОАО "ЦПП", 2008.–52 с.

115. СНиП 2.02-85 Основания гидротехнических сооружений, – Введ.01.01.1987. – Госстрой России. - М.: ФГУП ЦПП, 2004.–51 с.

116. Соловьев Ю.К., Пирожкова Л.М. Отчет о результатах детальной разведки месторождений известняков (Шугуровский, Ново-Письмянский, Бугульминский, Ютазинский районы). ТНГР, Казань, 1952.– 110 с. (РГФ, ТГФ, ТГРУ).

117. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.– Введ.01.07.2017. – М.: Минрегион России, 2011.–228 с.

118. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства.– Введ.01.07.2017. – М.: Стандартиформ, 2017.–123 с.

119. СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений.– Введ.14.02.2019. – М.: Стандартиформ, 2019.–102 с.

120. СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80. – Введ.01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012.–58 с.

121. Степанов В. А. Состав кор выветривания Верхнего Приамурья/В. А. Степанов, В. Г. Моисеенко, А. В. Мельников // Доклады Академии наук.– 2011.– Т. 438.–N 1. – С.82-90.

122. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Изд.Академ.наук СССР.– Москва,1960. –231 с.

123. Строкова Л.А., Епифанова Е.А. Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2021.– Т.332.– №7. – С. 95–106.

124. Строкова Л.А., Леонова А.В. Оценка суффозионной опасности на территории г.Томска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2021.– Т.332.– №5. – С. 49–59

125. Ступишин А.В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере

- Среднего Поволжья. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1967. – 292 с.
126. Сунгатуллин Р. Х. Влияние техногенеза на формирование современных кор выветривания и водоносных ареалов/Р. Х. Сунгатуллин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.–2010.– № 6.– С.494–502.
127. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов // Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 488 с.
128. Тер-Мартirosян З.Г., Анисимов В.В., Тер-Мартirosян А.З. Механическая суффозия: Экспериментальные и теоретические основы // Инженерная геология. –2009. –№4.– С. 28-40.
129. Торсуев Н.П. Карст, его влияние на природную территориальную систему, методы количественной оценки // Проблемы отраслевой и комплексной географии. Казань: Изд-во Казанского университета, 1976.– С. 98- 108.
130. Тихвинская Е.И. Тектоника / Геология Татарской АССР и прилегающей территории в пределах 109 листа. Ч. 2. –М.-Л.: Гос. научно-тех. издат., 1939. – 59 с.
131. Уткин М. М. Динамика развития подземных и поверхностных проявлений карста и методика оценки их опасности.– М.: Наука, 2019. – 117 с.
132. Федотов В.И. прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочных грунтов.– М:Стройиздат, 1988. – 125 с.
133. Хабибуллина Ф.С. Овражно-балочная расчлененность территории Татарстан. // Известия Казанского филиала АН СССР, Сер.геол.наук, вып.1.– 1950. – С.111-120
134. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов.– М.: ГЕОС, 2003.–216 с.
135. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз.– М.: Наука, 1986.– 97 с.
136. Хоменко В.П., Коломенский Е.Н. Влияние подземных полостей на состояние вышележащих дисперсных пород // Промышленное и гражданское строительство.– 2000. № 8.– С. 39–41.
137. Цилюрник Н.А. Испытания грунтов в стабилометре // Сб. «Исследование грунтов оснований. Применение виброметода для разработки грунтов». –М.: Госстройиздат, 1961.– С. 39-53.

138. Чаповский Е.Г. Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород): учебное пособие для вузов.– М.: Высшая школа, 1975. – 296 с.
139. Черняк Э.Р. Будущее – за региональными таблицами нормативных и расчётных показателей физико-механических свойств грунтов // Инженерная геология.– 2011.– №9. – С. 4-9
140. Черняковский А.Г. Элювий и продукты его преобразования (Казахстан и Средняя Азия). –М., Наука.,1966.–181 с.
141. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. Тр. ин-та геолог. наук. Вып. 135, 1951. – 275 с.
142. Швец В.Б. Элювиальные грунты как основания сооружений.–М.: Стройиздат, 1993. – 224 с.
143. Широков В.Н. и др. Рекомендации по оценке просадочности элювиальных грунтов Челябинской области.–Челябинск: ЧПИ, 1989.– 23с.
144. Ярг Л.А. Изменение физико-механических свойств пород при выветривании.–М.: Недра, 1974. – 144с.
145. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания.– М.: Недра, 1991. – 139 с.
146. Asmaa G.S. Review on granitic residual soils geotechnical properties // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Geoguide 3. Guide to rock and soil descriptions. Hong Kong: Geotechnical Engineering office, Civil Engineering Department, The Government of the Hong Kong, 1988.– 65 p.
147. Anikeev A, Chumachenko S Karst-suffusion sinkholes on the bugulma highland. // Geomorfologia. – 2011.– p.32-41.
148. Blight G.E., Leong E.C. Mechanics of residual soils. Taylor&Francis Group LLC., 2012.– 388 p.
149. BS 5930 Code of practice for site investigation. London: British Standards Institution, 1999.–328 p.
150. Derakhshan-Babaei F, Nosrati K, Tihomirov D et al. Ralating the spatial variability

of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones // *Geomorphology*. – 2020. – p.363. –375.

151. Dong X., Cohen M., Martin J. et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape // *Chemical Geology*.– 2019.– V. 527 DOI:10.1016/J.CHEMGEO.2018.05.021

152. Irfan T.Y. Mineralogy and fabric characterization and classification granitic rocks in Hong Kong: report № 41. Hong Kong: Geotechnical Engineering office, Civil Engineering Department, The Government of the Hong Kong, 1996.– 158 p.

153. Jworchan I. Mineralogy and chemical properties of residual soils. // *The Geological Society of London, IAEG*, – 2006.– Paper № 21.– p. 13–17.

154. E. Khranchenkov, M. Khranchenkov, D. Demidov, and A. Garaeva/Mathematical Modeling and Experimental Study of Erosion-Deposition Process in Deformable Porous Media // *Lobachevskii Journal of Mathematics*.– 2021.– Vol. 42.– No. 11.–p. 2545–2553.

155. Latypov A, Zharkova N, Mouraviev F. Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction's point of view (by the example of Kazan, Russia) // *Global View of Engineering Geology and the Environmental*. Proceeding of the international symposium and 9th Asian regional conference of IAEG, Beijing, China. – 2013. – p. 891-896.

156. Little A.L. The engineering classification of residual tropical soils. Proc. // *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 1.– 1969.– p. 1-10.

157. Mayne P. Stress-strain-strength-flow parameters from enhances in-situ tests. // In: *International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*. – 2001.– p. 27–48.

158. Meyer N, Kuhwald M, Petersen J et al Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. *Catena*, 2021. – 199 p.

159. Newstadt L.I. Methods of geological researching fracturing rock at engineering-geological research. Moscow - Leningrad, 1957.– 150 p.

160. Startsev A, Kasetsart. Soils on eluvium of Permian carbonate deposits and the change in their chemical properties under the influence of bog formation. // *Moscow*

University soil science bulletin (USA).–1985–№40(3). –p. 1-7.

161. Strokova L, Epifanova E Assessment of suffosion in the territory of settlement sabetta, the yamal peninsula.// Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering 332(7). –2021.– p. 95–106.

162. Strokova L, Leonova A Assessment of suffosion hazard on the territory of Tomsk. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering 332(5). – 2021.–p. 49–59.

163. Xiaolidong M, Cohen J, Martin D et al Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape. Chemical Geology, 2019.– 527 p.

164. Yongsheng Cheng Analysis on mineralization geological conditions of Danchi metallogenetic belt. Guanxi, China. // Procedia Environmental sciences 12.– 2012. –p.978-983.

165. Ziangirov R, Kashirskii V Use of static-penetration data to evaluate deformation properties of dispersive soils. // Soil Mechanics and Foundation Engineering 42(1). – 2005.– p. 15–21.