

На правах рукописи



Латыпов Айрат Исламгалиевич

**СТРОЕНИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОЛЩ
ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНОГО ЗАКАМЬЯ**

1.6.7 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный консультант:

Вознесенский Евгений Арнольдович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева (г. Москва)

Официальные оппоненты:

Строкова Людмила Александровна – доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Фролова Юлия Владимировна – доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной и экологической геологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, (г. Москва)

Красильников Павел Анатольевич – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора передовой инженерной нефтяной школы Альметьевского государственного технологического университета (г. Альметьевск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (г. Пенза)

Защита состоится 28 января 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.054.01 (Д 002.048.02) на базе ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук» (ИГЭ РАН) по адресу: 109004, г. Москва, ул. Николоямская, д. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГЭ РАН по адресу: 101000, г. Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2 и на интернет-сайте: <https://geoenv.ru/>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук



Е. В. Булдакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Территория Восточного Закамья находится в юго-восточной части Республики Татарстан южнее реки Кама и восточнее реки Шешмы и представляет собой ключевой регион с высокой антропогенной активностью. Здесь расположены несколько крупных городов (Нижнекамск, Альметьевск, Бугульма, Бавлы), разрабатываются крупнейшие месторождения нефти (Ромашкинское, Ново-Елховское, Шугуровское), строятся и эксплуатируются крупные промышленные заводы и объекты химической, нефтяной и сельскохозяйственной промышленности.

Необходимо отметить, что, несмотря на высокую антропогенную активность, Восточное Закамье остается малоизученным с точки зрения системных инженерно-геологических исследований, особенно по сравнению с восточной и центральной частями Республики Татарстан. Причем большая часть этой территории характеризуется сложной категорией инженерно-геологических условий, что обусловлено в первую очередь широким распространением элювиальных грунтов и развитием связанных с ними карстово-суффозионных процессов.

В настоящей работе элювиальные грунты рассматриваются как часть такой геологической формации, как кора выветривания, образовавшаяся в зоне гипергенеза в результате изменения (выветривания) исходных горных пород и слагающих их минералов.

Изучение элювиальных грунтов на указанной территории, как и во многих других регионах, часто ограничивается поверхностным описанием в общем контексте геологических условий. Исследования инженерно-геологических свойств элювиальных грунтов проводятся в основном частными инженерно-геологическими организациями в ходе выполнения изысканий и носят весьма локальный и поверхностный характер.

Элювиальные грунты Восточного Закамья являются продуктом выветривания коренных осадочных пород казанского и уржумского ярусов пермской системы, не представлены ни на каких картах и не выделены в стратиграфической шкале кайнозойской группы региона. Это создает серьезные трудности, т.к. часто бывает крайне сложно отличить элювиальный грунт от невыветрелой материнской породы как в процессе проведения полевых работ, так и при лабораторном изучении.

Для элювиальных грунтов характерна быстрая изменчивость их физико-механических свойств в плане и по глубине, часто невыдержанная и поэтому трудно прогнозируемая. Кроме того, сложность представляет отбор образцов таких грунтов, а отсутствие, с одной стороны, корреляционных зависимостей между данными полевых и лабораторных исследований, с другой – единой методики выделения инженерно-геологических элементов в соответствии со степенью выветрелости исходных пород приводит к значительному усложнению проведения инженерно-геологических исследований, увеличению сроков и стоимости проектирования и строительства.

Дополнительная актуальность исследования связана с современными тенденциями существенного ускорения (кратного по сравнению с текущим состоянием) темпов строительства, проектирования и изысканий. В отечественной инженерной геологии одним из путей решения такой задачи всегда являлось создание различного рода инженерно-геологических карт, корреляционных зависимостей и региональных таблиц, позволяя тем самым избежать принятия серьезных ошибочных решений в условиях дефицита времени на изыскания.

На большей части Восточного Закамья активно развиваются экзогенные процессы, такие как карст и суффозия, обусловленные растворимостью карбонатных пород и выносом частиц грунта

подземными водами и напрямую связанные с наличием элювиальных грунтов как карбонатного, так и терригенного типа. Полевые маршрутные наблюдения показали, что суффозионные формы встречаются на 36 % всей площади данной территории. Поэтому значительная часть выполненной работы посвящена исследованию суффозионной опасности.

Таким образом, изучение элювиальных грунтов и инженерно-геологических особенностей территории Восточного Закамья становится крайне важным для безопасности и устойчивого развития региона. Полученные данные и результаты исследований позволяют эффективно прогнозировать риски и разрабатывать меры по инженерной защите от неблагоприятных геологических процессов, а также оптимизировать проектирование и строительство инфраструктуры и сооружений на этой территории.

Степень изученности проблемы. Исследования элювиальных грунтов в отечественной инженерной геологии стали активно развиваться в период 1950–1980 гг., что связано прежде всего с фундаментальными трудами Б. Б. Польшова (1934), И. И. Гинзбурга (1946, 1947), Е. М. Сергеева (1952, 1986), К. И. Лукашева (1956, 1958), Г. А. Голодковской (1968), В. Т. Трофимова (1977), Л. А. Ярг (1974, 1991) и др. Их основным посылом являлся тезис, что строение и состав грунтовых толщ, а также распределение показателей состава и свойств грунтов тесно связаны с геологическим строением территории. Были предложены схемы расчленения кор выветривания на зоны, в т. ч. исходя из тектонических факторов.

Важное значение в изучении физико-механических свойств элювиальных грунтов имели исследования Ф. П. Саваренского (1937), Н. В. Коломенского (1952), Н. А. Циллорика (1961), Ю. Д. Матвеева (1968), В. Д. Ломтадзе (1970), Г. К. Бондарика (1971), Г. С. Золотарева (1971), Л. А. Ярг (1974), Е. Г. Чаповского (1975), В. П. Маричева (1976), Н. Н. Масловой (1982), Е. В. Сергеева (1986), В. Н. Широкова (1989), В. Б. Швеца (1993), Э. Р. Черняка (2011), А. Г. Барановского (2015) и мн. др. Активное применение методов математической статистики в их работах позволило раскрыть основные закономерности изменчивости свойств и состава грунтов для различных территорий.

В современных исследованиях часто изучаются небольшие по площади объекты или решаются конкретные прикладные задачи. Например, работы Н. М. Конне Амбеньян (2012), А. Г. Барановского (2018), Р. К. Илаловой (2018) и нек. др. посвящены изучению кор выветривания в ограниченных областях, тогда как А. А. Сафронова (1990), Р. М. Каримов (2007), Р. С. Смирнов, В. О. Городниченко, Е. Н. Сычкин (2015), А. Н. Галкин (2016), Д. М. Шестернев (2017), С. А. Александров, О. М. Гуман (2019), И. В. Абатурова, Т. С. Бобин, Л. А. Стороженко (2022) и др. в своих трудах фокусируются на решении конкретных инженерных задач возведения зданий или сооружений на элювиальных основаниях.

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

За рубежом исследования элювиальных грунтов начали активно развиваться также с середины XX столетия. Большинство из них нацелены на поиск закономерностей в характеристиках выветривания в различных зонах и районах, например А. L. Little (1969),

P. G. Fookes et al. (1977), W. R. Dearman (1978), F. Derakhshan-Babaei, K. Nosrati, D. Tihomirov, M. Chistl, H. Sadough & M. Egli (2020), S. Meyer, M. Kuhwald, M. Petersen & R. Duttman (2021) и др., в то же время часть работ сфокусирована на изучении влияния процессов выветривания с точки зрения недопущения развития неблагоприятных факторов для проектирования и строительства, как, например, M. Xiaolidong, J. Cohen, D. Martin, A. McLaughlin, N. BradMurray, M. Ward, J. Flint & B. Heffernan (2019).

Важный вклад в изучение кор выветривания внесли C. D. Ollier (1969), M. D. A. Thomas (1974), P. Migoń (2004) и др., исследовав закономерности развития кор выветривания в различных климатических и геологических условиях, а также влияние литологии материнских пород на характеристики продуктов выветривания.

Значительное внимание уделено пространственному распространению кор выветривания и построению специальных карт. В этой области работали S. M. Hill (2000), R. A. Eggleton (2001) и др. Применение ГИС-технологий позволило детально картировать распространение различных типов кор выветривания.

Среди ряда работ, посвященных изучению инженерно-геологических свойств продуктов выветривания и их классификации с целью оценки пригодности пород в качестве грунтовых оснований, можно отметить исследования W. R. Dearman (1978), P. G. Fookes (1997).

В последние годы активно изучается влияние изменений климата и антропогенных факторов на скорость выветривания горных пород и эволюцию кор выветривания. Данным вопросам посвящены работы A. Dosseto (2008), J. L. Dixon (2009).

Таким образом, тема кор выветривания продолжает активно разрабатываться зарубежными специалистами, при этом особое внимание уделяется региональным исследованиям и прикладным аспектам инженерной геологии и геоэкологии. Указанные направления представляются важными для дальнейшего изучения кор выветривания, в т. ч. в России.

Цель диссертационной работы заключается в инженерно-геологической характеристике покровных элювиальных отложений на территории Восточного Закамья с установлением особенностей их состава, распространения, строения профиля выветривания, закономерностей изменения физико-механических свойств, а также анализом развития связанных с ними экзогенных процессов.

Задачи исследования:

- анализ и систематизация существующих знаний об элювиальных грунтах, истории их исследования, закономерностей распространения и физико-механических свойств грунтов различных зон коры выветривания;
- выявление особенностей распространения карбонатно-терригенных элювиальных грунтов, выделение структурных горизонтов кор выветривания в пределах исследуемой территории;
- инженерно-геологическое районирование территории с учетом распространения элювиальных грунтов;
- изучение изменчивости минерального и химического состава, физико-механических свойств элювиальных карбонатно-терригенных грунтов по профилю выветривания;
- лабораторные и полевые исследования образцов грунтов и грунтовых массивов различных участков;
- разработка региональных таблиц нормативных значений физико-механических характеристик грунтов;

- выполнение пространственного анализа распространения элювиальных грунтов с использованием ГИС-технологий и последующим построением тематических карт;
- оценка суффозионной опасности с учетом совокупного влияния наиболее существенных факторов.

Фактический материал. В процессе полевых работ автором проведено полевое описание 1106 точек обследования на территории Восточного Закамья, пробурены 232 инженерно-геологические скважины и выполнено 180 точек статического зондирования, а также лабораторно исследованы несколько сотен образцов грунтов. В ходе анализа физико-механических свойств элювиальных грунтов, при построении корреляционных зависимостей и региональных таблиц дополнительно использовались фондовые материалы инженерно-геологических изысканий, которые были выполнены на исследуемой территории различными организациями с 1973-го по 2024-й гг.

В качестве **объекта исследований** выбраны карбонатные и терригенные грунты зоны гипергенеза территории Восточного Закамья.

Методология и методы исследования. Основные положения и выводы диссертационной работы основаны на обширном и многолетнем научно-практическом опыте автора, включающем теоретические исследования, полевые маршрутные работы и лабораторные испытания карбонатно-терригенных элювиальных грунтов на территории Восточного Закамья.

Лабораторные исследования физико-механических свойств элювиальных грунтов проводились согласно требованиям СП 22.13330.2016, СП 47.13330.2016 и соответствующих стандартов, таких как ГОСТ 12536–2014, ГОСТ 5180–2015, ГОСТ 12248.1–2020, ГОСТ 25100–2020, ГОСТ 30416–2020.

Определение деформационных и прочностных свойств грунтов проводилось с использованием серийно выпускаемых приборов компании «НПП Геотек». Для выполнения фильтрационно-суффозионных испытаний использовалась установка собственной разработки автора, имеющая патент № 2022110200 от 15.04.2022 МПК-2022.01 G01N 3/10. При этом применялись методики, соответствующие ГОСТ 25584–2016 для определения коэффициента фильтрации грунтов, и методики определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ).

Минеральный состав элювиальных образований определен методом рентгенографических исследований на дифрактометре D2 Phaser (Bruker). Микроструктурные характеристики элювиальных грунтов изучены на электронном микроскопе FEI XL-30ESEM.

Исследования элементного состава проводились на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре S8 Tiger (Bruker), который позволяет определять элементный состав твердых, порошкообразных и жидких образцов в диапазоне от В до U в вакууме или атмосфере гелия.

Картографические модели построены с использованием программного продукта ArcGIS 10.8. При построении карт суффозионной опасности при определении весов каждого фактора использовался метод соотношения частотностей (frequency ratio, FR).

Обработка результатов экспериментальных исследований и статистическая обработка данных осуществлена с применением программы Microsoft Excel.

Использование вышеобозначенных методов и инструментов исследования позволило получить всесторонние, статистически достоверные и надежные данные, послужившие основой для написания выводов диссертационной работы.

Научная новизна исследований:

- впервые выполнена инженерно-геологическая оценка толщ элювиальных грунтов на территории Восточного Закамья, включающая характеристику их видов, мощности и областей распространения;
- впервые выполнено детальное описание строения, мощности, минерального состава и физико-механических свойств грунтов выделенных автором зон структурного и бесструктурного элювия по карбонатным и терригенным породам;
- сформулированы основные закономерности формирования состава, строения и свойств элювиальных грунтов региона в процессе их эволюции в четвертичное время;
- определены количественные диагностические критерии выделения зон выветривания для терригенных элювиальных грунтов;
- впервые для оценки существующей и ожидаемой суффозионной опасности грунтов исследованной территории предложено новое прогнозное решение, основанное на сочетании для каждого участка неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- а) существенно расширены представления о генезисе, распространении и инженерно-геологических характеристиках элювиальных грунтов на территории Восточного Закамья;
- б) выявлены взаимосвязи между минеральным, химическим составом, строением профилей выветривания и физико-механическими свойствами терригенных и карбонатных элювиальных грунтов Восточного Закамья,
- в) разработаны региональные таблицы механических характеристик терригенных элювиальных грунтов, что имеет значимое практическое применение при проведении изысканий и проектировании инженерных объектов;
- г) предложен подход к идентификации элювиальных песчаников с помощью метода статического зондирования;
- д) созданы карты инженерно-геологического районирования, мощностей элювия по терригенным и карбонатным породам, карты суффозионной опасности для исследованной территории, которые могут быть использованы для планирования инженерных изысканий при градостроительном проектировании;
- е) разработана и внедрена установка для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов (патент № 2022110200), позволяющая повысить точность и достоверность результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. В пределах Восточного Закамья обособляются территории, различающиеся по проявлениям гипергенных процессов преобразования осадочных пород среднепермского возраста и закономерностям строения элювия. В центральной части, на верхнем плато, распространен преимущественно элювий по карбонатным породам, в пределах среднего плато – карбонатно-терригенный тип элювиальных грунтов, а на нижнем плато – элювий по терригенным породам, что обусловлено преобладающими литотипами осадочных пород, а также принадлежностью к эрозионно-денудационным водораздельным и приводораздельным структурам.

2. Инженерно-геологическая характеристика массивов терригенных элювиальных грунтов может быть выполнена только с выделением зон гипергенных преобразований с контрастными отличиями классификационной принадлежности, свойств, минерального и химического состава: для песчаных грунтов четырех (зона элювиальных песков, зона элювированных песчаников, зона химической дезинтеграции песчаников, зона сохранного массива) и для глинистых грунтов трех (зона элювиальных глин, зона элювированных глин, зона сохранного массива).

3. На территории Восточного Закамья элювиальные карбонатные грунты распространены преимущественно в пределах верхнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, а в их разрезе отчетливо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, различающихся различной степенью преобразованности материнских пород, механическим и минеральным составом, а также структурно-текстурными признаками. Выделение этих горизонтов должно лежать в основе оценки физико-механических свойств и суффозионной устойчивости карбонатных элювиальных грунтов.

4. Оценка существующей и ожидаемой суффозионной опасности на территории Восточного Закамья в карбонатных и терригенных элювиальных грунтах может быть выполнена на основании количественного прогнозирования, основанного на сочетании для каждого участка неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов обеспечиваются применением современных лабораторных методов исследования, приборов и устройств для испытаний и исследований грунтов, значительным объемом фактического материала, а также верификацией прогнозных построений прямыми наземными наблюдениями. Полученные зависимости основаны на использовании современных математических методов статистической обработки данных по каждому виду исследований, анализу сходимости результатов с общепринятыми положениями механики деформирования и разрушения грунтов и грунтовых массивов. Выводы, полученные в результате исследования, не противоречат друг другу и согласуются с современными представлениями в области инженерной геологии.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях в городах: Томск (2015), Оттава (2016), Москва (2018, 2021, 2022, 2024), Санкт-Петербург (2019, 2022), Барнаул (2021), Саратов (2021), Уфа (2022), Минск (2023), Белград (2024), Дербент (2024), Пермь (2024). По теме диссертации опубликовано 28 работ, из них 10 – в журналах из перечня ВАК, 7 – в изданиях, индексируемых в базе Scopus. Получен 1 патент.

Личный вклад автора в работу. Автор принимал непосредственное участие в сборе, обработке и анализе данных об элювиальных грунтах на территории Восточного Закамья, провел комплексное изучение минерального состава, строения и физико-механических свойств элювиальных грунтов с последующим выделением структурных горизонтов и зон кор выветривания. На основании полученных данных под руководством автора построены серия тематических инженерно-геологических карт, а также карта инженерно-геологического районирования с выделенными участками уровней опасности развития суффозионных процессов. Сконструировал новое испытательное устройство и провел исследования в области моделирования развития суффозионных процессов с учетом коэффициентов неоднородности бесструктурного элювия и трещиноватости структурного элювия. Лично обобщил представленные в диссертации инженерно-геологические материалы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и литературы; содержит 92 рисунка, 35 таблиц. Общий объем работы 256 страниц. Библиографический список включает 217 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, приведена информация о фактическом материале, личном вкладе автора, а также о научной новизне, теоретической и практической значимости работы. **Первая глава** отражает современное состояние отечественных и зарубежных исследований элювиальных грунтов. Во **второй главе** представлены общая инженерно-геологическая характеристика территории Восточного Закамья, включая геологическое строение, гидрогеологические условия, опасные геологические и инженерно-геологические процессы, и результаты инженерно-геологического районирования. **Третья глава** показывает особенности строения, распространения и условия формирования кор выветривания терригенных массивов. Сформулированы факторы формирования и пространственного распространения; описаны инженерно-геологические свойства, особенности минерального состава и классификации профилей выветривания; приведены результаты полевых исследований толщ терригенных элювиальных грунтов. **Четвертая глава** посвящена изучению минерального и химического состава, физико-механических свойств карбонатных элювиальных грунтов. Дано описание строения профилей кор выветривания и факторы их формирования. **Пятая глава** подробно характеризует суффозионную опасность исследованной территории, включая оценку суффозионности грунтов бесструктурного элювия, трещиноватости грунтовых массивов зоны структурного элювия, результаты экспериментальных исследований развития процесса суффозии и построение тематических карт. Выполнена количественная оценка суффозионной опасности. В **заключении** приведены основные выводы исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук, профессору Е. А. Вознесенскому и кандидату геолого-минералогических наук, доценту Э. А. Королеву за содержательные научные консультации и советы, а также признательность кандидату геолого-минералогических наук, доценту А. Н. Гараевой за поддержку и всестороннюю помощь и инженерам Г. М. Ескиной и О. Ю. Андрушкевичу за содействие.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первое защищаемое положение

В пределах Восточного Закамья обособляются территории, различающиеся по проявлениям гипергенных процессов преобразования осадочных пород среднепермского возраста и закономерностям строения элювия. В центральной части, на верхнем плато, распространен преимущественно элювий по карбонатным породам, в пределах среднего плато – карбонатно-терригенный тип элювиальных грунтов, а на нижнем плато – элювий по терригенным породам, что обусловлено преобладающими литотипами осадочных пород, а также принадлежностью к эрозионно-денудационным водораздельным и приводораздельным структурам.

Восточное Закамье представляет собой геоморфологическую структуру на востоке Восточно-Европейской платформы в Предуралье. В современном рельефе на территории Восточного Закамья выделяются две крупные морфологические структуры: Бугульминско-Белебеевская возвышенность, занимающая основную и западную части, и Камско-Бельская низменность, расположенная на северо-востоке. Они созданы в неоген-четвертичное время положительными неотектоническими движениями и экзогенными рельефообразующими процессами. В тектоническом плане территория приурочена к Южно-Татарскому своду, который прослеживается как положительная структура по кровле всех стратиграфических подразделений, начиная с поверхности кристаллического фундамента. Тектонические поднятия территории способствовали заложению в неогене узких протяженных долин рек Шешма, Зай, Мензеля, Кучма и др., впадающих в реку Кама и по пути следования пересекающих поверхности верхнего, среднего и нижнего плато Восточного Закамья. Несколько позже активизировались склоновые процессы, направленные на нивелирование неогеновых эрозионных форм рельефа за счет сноса с вершин денудационных останцев пролювиально-делювиальных отложений.

Бугульминско-Белебеевская возвышенность является самой высокой на территории Татарстана. Высоты водоразделов повсеместно достигают 300–330 м, а в орографическом узле истоков рек Дымка, Тумбарлинка, Сула находится самая высокая точка – 375 м. Для Бугульминско-Белебеевской возвышенности характерны следующие геоморфологические особенности: высоко приподнятый ступенчатый рельеф водоразделов, густое эрозионное расчленение с глубоко врезанными резко ассиметричными речными долинами различного возраста, широкое распространение структурных террас на склонах и карстово-суффозионных форм.

Камско-Бельская низина, в свою очередь, характеризуется ровными, субгоризонтальными, исключительно плавными очертаниями рельефа с менее выраженными границами между ступенями водоразделов.

Граница между этими районами условно может быть проведена там, где высоты водоразделов снижаются до 200–180 м.

В рамках настоящей диссертационной работы выполнено маршрутное обследование территории с описанием 1106 точек наблюдения (рис. 1), в качестве которых использовались карьеры, обнажения, строительные площадки, шурфы и закопушки, а также горные выработки (инженерно-геологические скважины). В каждой точке наблюдения был оформлен паспорт с информацией о геологическом строении с выделением литотипов грунтов и зон дезинтеграции, описанием структурно-текстурных особенностей грунтов и грунтовых массивов, выходах грунтовых

вод (положении их уровня). Для лабораторных исследований отобраны образцы нарушенного и ненарушенного сложения.

Одна из целей данного этапа исследований – составление карт инженерно-геологического районирования как результат выявления в пространстве на основе совокупности теоретических положений и методических приемов объективно существующих территориальных элементов, обладающих какими-либо общими инженерно-геологическими признаками отграничения их от территорий, этими признаками не обладающих, их картографирования и описания (Трофимов 1979).

Исследование зиждется на принципах регионального генетико-морфологического или естественно-исторического районирования, при котором на основе определенных классификационных признаков обособляют, выявляют, классифицируют и характеризуют территориальные единицы разного порядка.

Масштаб исследования, характер изученности и сложность изучаемой структуры для территории Восточного Закамья подразумевал региональный тип районирования с выделением всех таксонометрических единиц от области до инженерно-геологического подрайона включительно.

Районируемая территория Восточного Закамья рассматривалась как часть региона первого порядка – Русской платформы. В соответствии с систематикой таксонометрических единиц, предложенной В. Т. Трофимовым, относится к провинции распространения пород с жесткими связями и пород без жестких связей в пределах континентальной части, подпровинции преимущественного распространения пород без жестких связей, зоне распространения талых пород, подзоне распространения слабо и умеренно влажных пород.

При выделении инженерно-геологических областей первого порядка учитывались прежде всего история геологического развития территории за новейший этап, характер неотектонических движений, особенности рельефа и геологическое строение поверхностной толщи. Поэтому в качестве областей первого порядка выбраны геоморфологические структуры: I. КАМСКО-БЕЛЬСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ и II. БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ.

Выделение такой таксонометрической единицы, как район, основано на принадлежности к определенному типу рельефа, что обуславливает в т. ч. общие признаки геологического строения без учета многих частных особенностей. В связи с этим на территории Восточного Закамья выделены следующие районы: А – эрозионно-аккумулятивные придолинные; Б – эрозионно-денудационные приводораздельные; В – эрозионно-денудационные водораздельные (рис. 2).

А. Эрозионно-аккумулятивные придолинные районы. Этот уровень рельефа образуют первые и вторые надпойменные террасы верхнеплейстоценового возраста, а также поймы долин средних и крупных рек и нерасчлененные поверхности поймы и первой надпойменной террасы в долинах малых рек. Они развиты более или менее крупными фрагментами во всех долинах крупных (Ик), средних (Зай, Степной Зай, Шешма, Мелля, Мензеля) и многих малых рек; в один уровень объединены, т. к. их абсолютные и относительные высоты близки между собой, переходы слабо выражены, особенно в долинах средних рек, где наиболее распространены. Ширина нерасчлененных террас в этих долинах от 200–500 м до 3–5 км в низовьях. В долинах малых рек такие террасы встречаются малыми фрагментами шириной от 50–100 м до 0,5–1,0 км по обеим сторонам русла, в т. ч. на правобережье. Особенно это характерно для устьевых участков левых притоков рек Ик, Степной Зай, Шешма. Относительные высоты первой террасы в зависимости от размера долины колеблются от 2,5–3 до 5,5–6,5 м. Высоты второй надпойменной террасы колеблются более значительно – от 7 до 15 м.

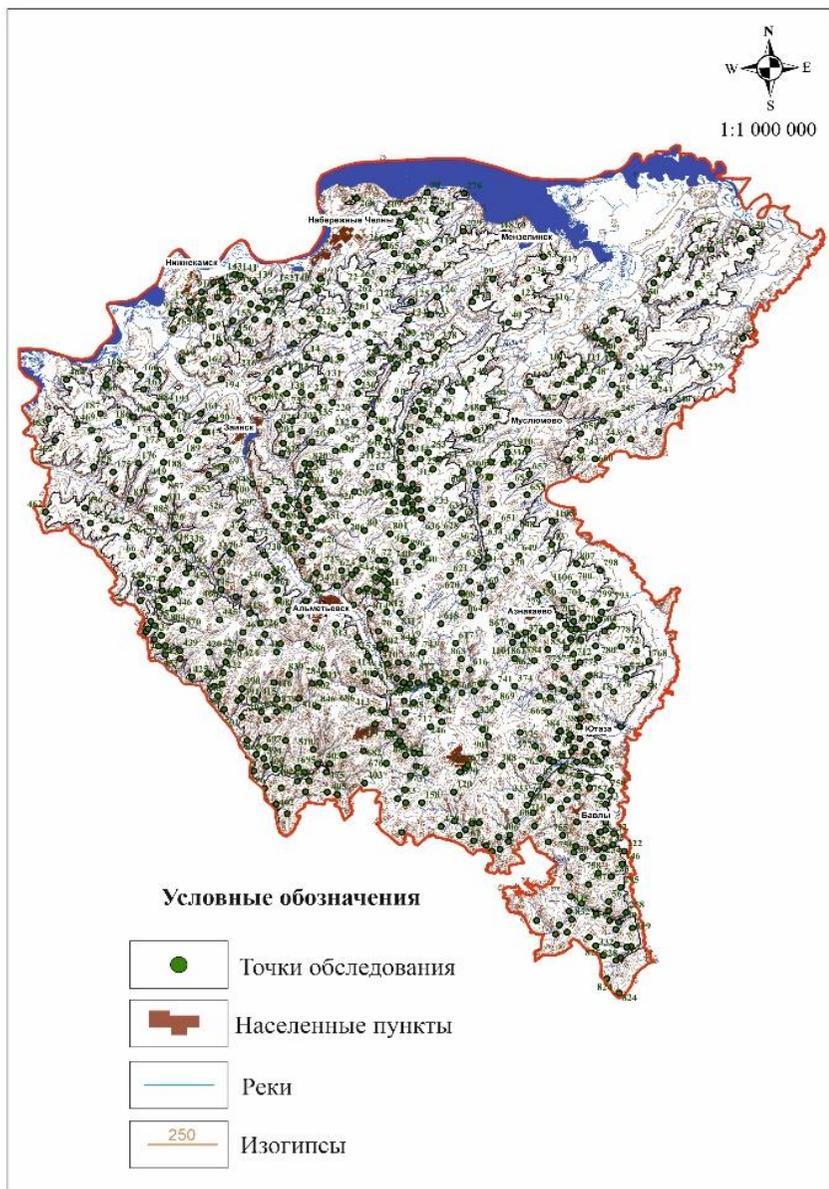


Рис. 1. Карта фактического материала с точками наблюдения

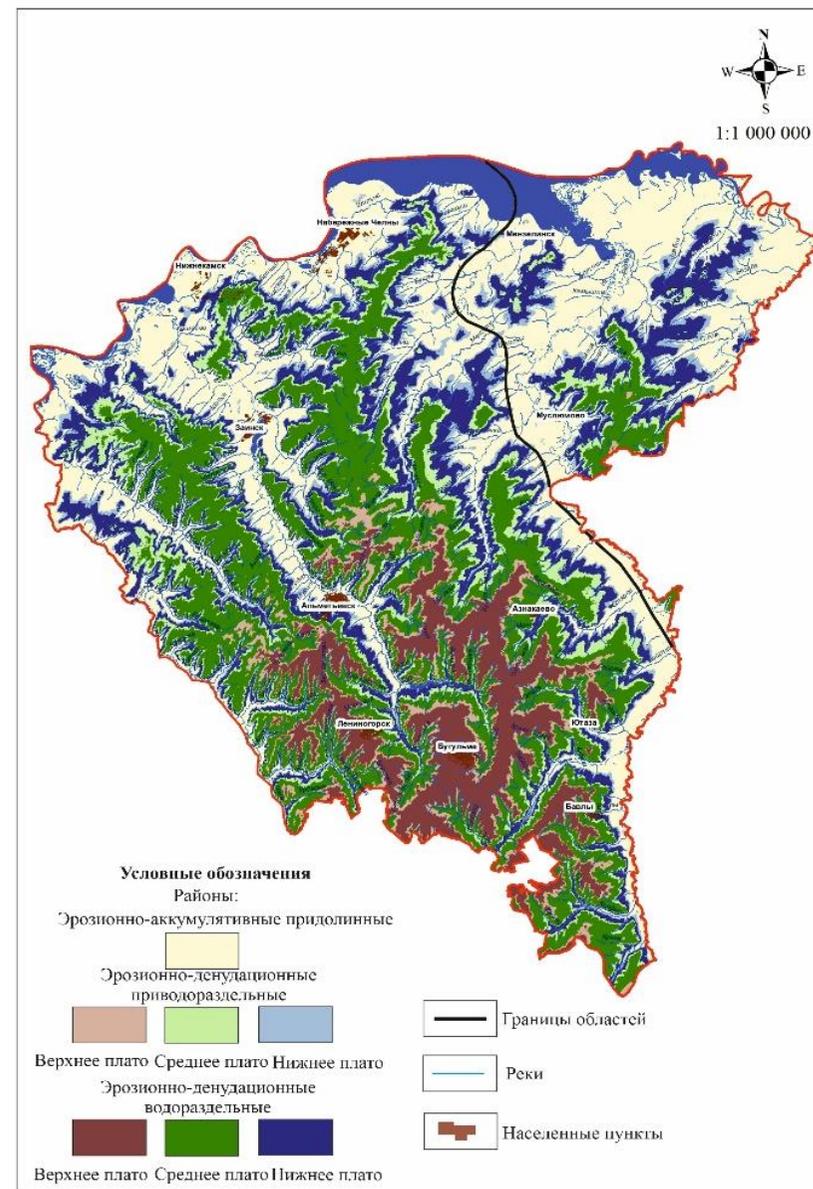


Рис. 2. Карта геоморфологического районирования (Латыпов и др.)

В соответствии с геологическим строением слагающих и подстилающих пород район разбит на два подрайона:

1) пойменно-русловой аккумулятивный. Представлен современными аллювиальными образованиями пойм и русел всех рек района (абс. высоты 43–85 м). Общая мощность аллювия крупных рек колеблется от 10 до 25 м, средних и малых – от 7 до 16 м. Представлен песками, суглинками и линзами глин, в основании – галечниками. Подстилающие горные породы – пески и глины четвертичного и неогенового возраста с линзами гравия и гальки;

2) поверхности и примыкающие к ним склоны речных террас разной крутизны (абс. высоты 85–120 м). В геологическом строении принимают участие аллювиально-делювиальные отложения террас крупных рек или нижние части склонов вдоль террас малых рек. 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. Подстилающие породы – преимущественно казанского яруса (песчаники, глины, алевролиты, аргиллиты, реже известняки) и частично отложения уфимского яруса (доломиты, мергели, глины с прослоями песчаников).

Б. Эрозионно-денудационные водораздельные районы. Данный вид рельефа располагается ниже водораздельных поверхностей. Приводораздельные районы верхнего, среднего и нижнего плато сложены преимущественно элювиально-делювиальными отложениями, а склонов, разделяющих нижнее плато и аккумулятивные склоны речных долин, – пролювиально-делювиальными. Состав элювиально-делювиальных образований в значительной мере определяется свойствами подстилающих пород. Строение их весьма сложное, что обусловлено литологическими особенностями слагающих их пород. Пологие склоны сложены суглинками, супесями и слабо уплотненными пылеватými песками. Углы наклона склонов изменяются от 30 до 15°. На крутых слабо задернованных склонах часто наблюдается ступенчатость, что обусловлено выходами карбонатных пород. Мощность таких образований чаще всего составляет 3–5 м, иногда может увеличиваться до 10–15 м. Вверх по склону мощность их сокращается до 2–3 м. Пролувиально-делювиальные отложения образованы за счет течения и сноса в перигляциальных условиях мелкообломочного и глинистого материала и накопления его в пониженных частях. Подстилающие породы – карбонатно-глинистые отложения казанского яруса (переслаивающиеся известняки, песчаники, глины, мергели, доломиты и алевролиты).

В соответствии с гипсометрическими уровнями этот район разделен на три подрайона для области Бугульминско-Белебеевской возвышенности и два подрайона для области Камско-Бельской низменности. Подробное описание подрайонов дано на рис. 3 и 4.

В. Эрозионно-денудационные водораздельные районы. 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. высотами 280–376 м. Водоразделы плоские, слабо всхолмленные или плосковыпуклые. Наибольшая мощность элювиальных отложений наблюдается на низких водоразделах (нижнее плато) с мощностью от 0,5 до 10 м. Абс. высоты плато находятся в пределах 140–190 м. Подстилающие породы – преимущественно казанского яруса и частично на высоких водоразделах уржумского яруса.

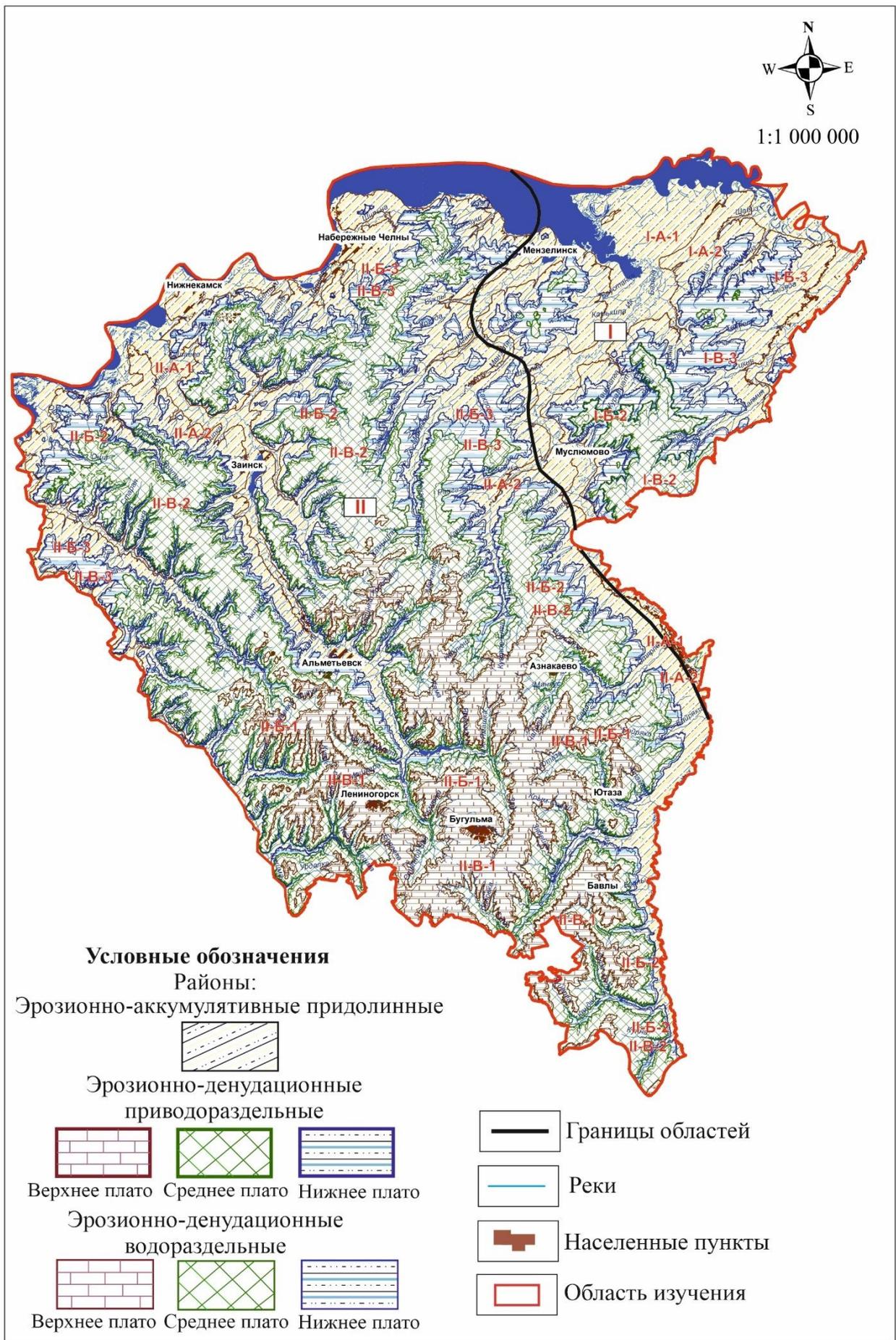
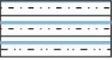
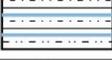
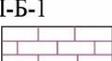
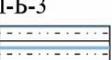
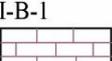


Рис. 3. Карта инженерно-геологического районирования (Латыпов и др.)

Условные обозначения к карте инженерно-геологического районирования

Система типологических таксонов, принятых при районировании

Области	Районы	Подрайоны	Индекс на карте	
КАМСКО-БЕЛЬСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ	Эрозионно-аккумулятивные придолинные	Пойменно-руслевой аккумулятивный (абс.высоты 43-85 м), сложенный современным аллювием, подстилаемым породами четвертичного и неогенового возраста.	I-A-1 	
		Поверхности и примыкающие к ним склоны речных террас разной крутизны (абс. высоты 85-120 м), сложенные аллювиально-делювиальными отложениями, подстилаемыми преимущественно пермскими породами казанского уфимского ярусов.	I-A-2 	
	Эрозионно-денудационные водораздельные	Денудационные склоны, разделяющие среднее и нижнее плато, сложенные элювиально-делювиальными отложениями по карбонатным и терригенным породам преимущественно казанского яруса.	I-B-2 	
		Денудационные склоны, разделяющие нижнее плато и аккумулятивные склоны речных долин (абс.высоты 120-140 м), сложенные пролювиально-делювиальными отложениями, подстилаемыми породами четвертичного и неогенового возраста.	I-B-3 	
	Эрозионно-денудационные водораздельные	Среднее плато (абс.высоты 200-250 м), сложенное элювиальными отложениями по пермским карбонатным и терригенным породам казанского и уржумского (на высоких частях) ярусов.	I-B-2 	
		Нижнее плато (абс. высоты 140-180 м), сложенные элювиальными отложениями по терригенным породам казанского яруса.	I-B-3 	
	БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕВСКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ	Эрозионно-аккумулятивные придолинные	Пойменно-руслевой аккумулятивный (абс.высоты 75-100 м), сложенный современным аллювием, подстилаемым породами четвертичного и неогенового возраста.	II-A-1 
			Поверхности и примыкающие к ним склоны речных террас разной крутизны (абс. высоты 100-120 м), сложенные аллювиально-делювиальными отложениями, подстилаемыми преимущественно пермскими породами казанского уфимского ярусов	II-A-2 
Эрозионно-денудационные водораздельные		Денудационные склоны, разделяющие верхнее и среднее плато, сложенные элювиально-делювиальными отложениями по пермским карбонатным породам преимущественно казанского яруса	II-B-1 	
		Денудационные склоны, разделяющие среднее и нижнее плато, сложенные элювиально-делювиальными отложениями по пермским карбонатным и терригенным породам преимущественно казанского яруса.	II-B-2 	
		Денудационные склоны, разделяющие нижнее плато и аккумулятивные части речных долин, сложенные пролювиально-делювиальными отложениями, подстилаемыми породами четвертичного и неогенового возраста.	II-B-3 	
Эрозионно-денудационные водораздельные		Верхнее плато (абс. высоты 280-375 м), сложенное элювием по пермским карбонатным породам преимущественно уржумского яруса.	II-B-1 	
		Среднее плато (абс. высоты 200-260 м), сложенное элювием по карбонатным и терригенным породам преимущественно казанского и уржумского (на высоких частях) ярусов.	II-B-2 	
		Нижнее плато (абс. высоты 140-190 м), сложенное элювием по терригенным породам казанского яруса.	II-B-3 	

Прочие условные обозначения

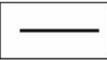
 Границы областей	 Границы подрайонов	 Область изучения
 Границы районов	 Реки	 Населенные пункты

Рис. 4. Условные обозначения к карте инженерно-геологического районирования

В соответствии с гипсометрическими уровнями этот район разделен на три подрайона для области Бугульминско-Белебеевской возвышенности (верхнее, среднее и нижнее плато) и два подрайона для области Камско-Бельской низменности (среднее и нижнее плато).

Неодинаковая устойчивость осадочных пород к выветриванию способствовала некоторой их дифференцированности по составу на различных плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности и Камско-Бельской низменности.

Верхнее плато сложено преимущественно прочными светло-серыми доломитами с прослойками красно-бурых и зеленовато-серых доломитовых мергелей биармийского отдела пермской системы. Большинство располагающихся здесь вершин эрозионно-денудационных холмов бронированы плотными карбонатами. Поверхность среднего плато слагают преимущественно морские песчаники и доломиты с прослойками глин и доломитовых мергелей, нижнего – в основном глины и песчаники. Области преимущественного распространения тех или иных литологических разновидностей осадочных пород определили особенности регионального районирования территории возвышенности по типу гипергенных преобразований.

Таким образом, в пределах Восточного Закамья четко обозначились территории со своими особенностями протекания гипергенных процессов преобразования осадочных пород среднепермского возраста. В центральной части на площадке верхнего плато распространен преимущественно элювий по карбонатным породам, среднего плато – карбонатно-терригенный тип элювия, нижнего плато – терригенный. Подобная закономерность проявления гипергенных процессов обусловлена преобладающими литотипами осадочных пород, слагающих участки верхнего, среднего и нижнего плато.

Второе защищаемое положение

Инженерно-геологическая характеристика массивов терригенных элювиальных грунтов может быть выполнена только с выделением зон гипергенных преобразований с контрастными отличиями классификационной принадлежности, свойств, минерального и химического состава: четырех для песчаных грунтов четырех (зона элювиальных песков, зона элювированных песчаников, зона химической дезинтеграции песчаников, зона сохранныго массива) и трех для глинистых грунтов трех (зона элювиальных глин, зоны элювированных глин, зоны сохранныго массива).

При выполнении инженерно-геологического районирования установлено, что в пределах территории Восточного Закамья элювиальные терригенные грунты распространены на среднем и нижнем плато и практически не встречаются на участке верхнего плато. При этом мощность элювия по терригенным породам увеличивается с понижением абсолютных высот, достигая значения 10 м (рис. 5).

Участок среднего плато отнесен к смешанному типу распространения элювиальных пород с преобладанием элювия по морским песчаникам казанского яруса, что обусловлено лучшей проницаемостью пород для поверхностных атмосферных вод и наличием в них нестойкого к растворению кальцитового цемента.

Анализ строения измененных толщ песчаников по разрезу позволил выделить некоторую зональность и стадийность их постседиментационного преобразования под влиянием процессов гипергенеза (рис. 6).

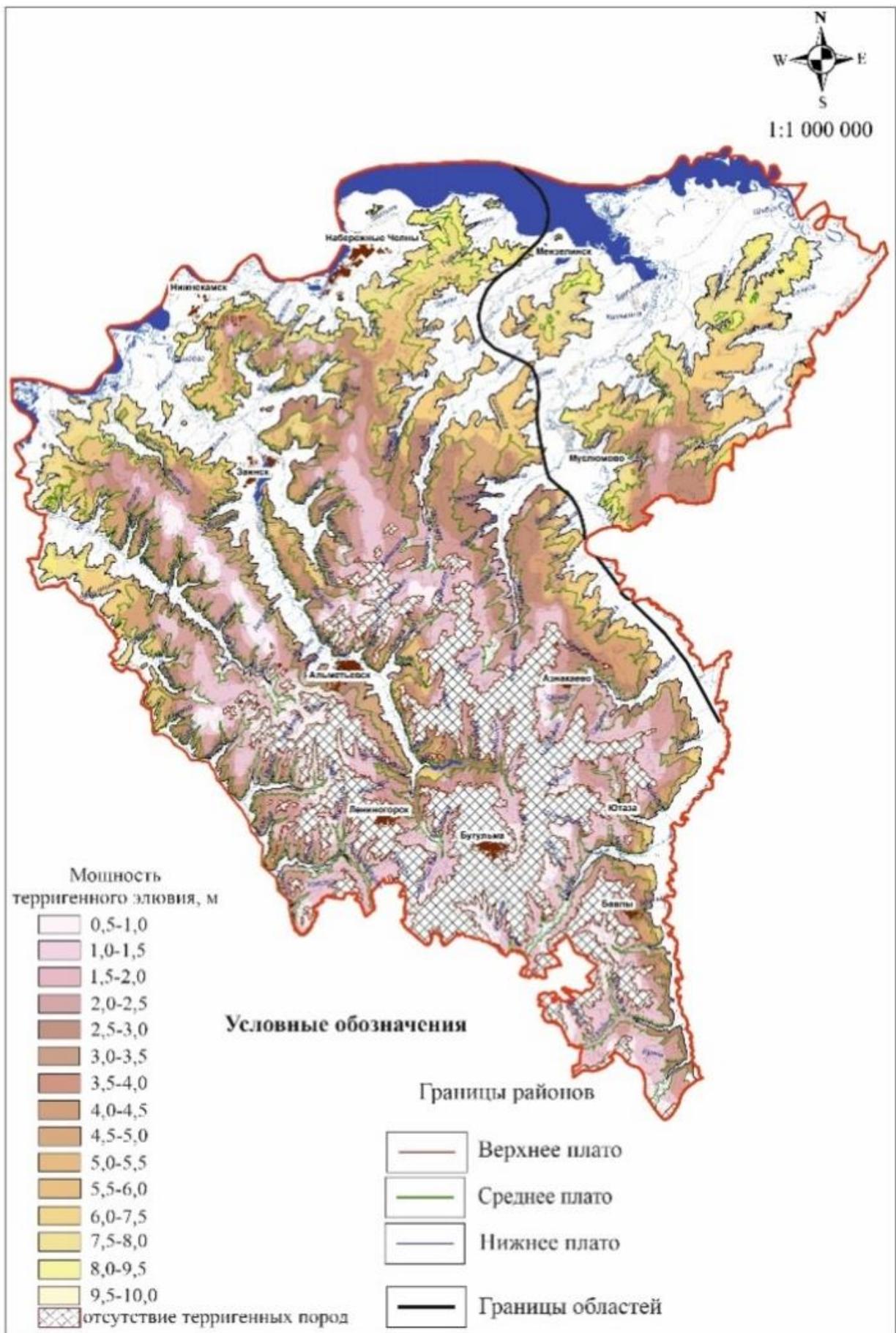


Рис. 5. Карта мощности элювия по терригенным породам (Латыпов и др.)

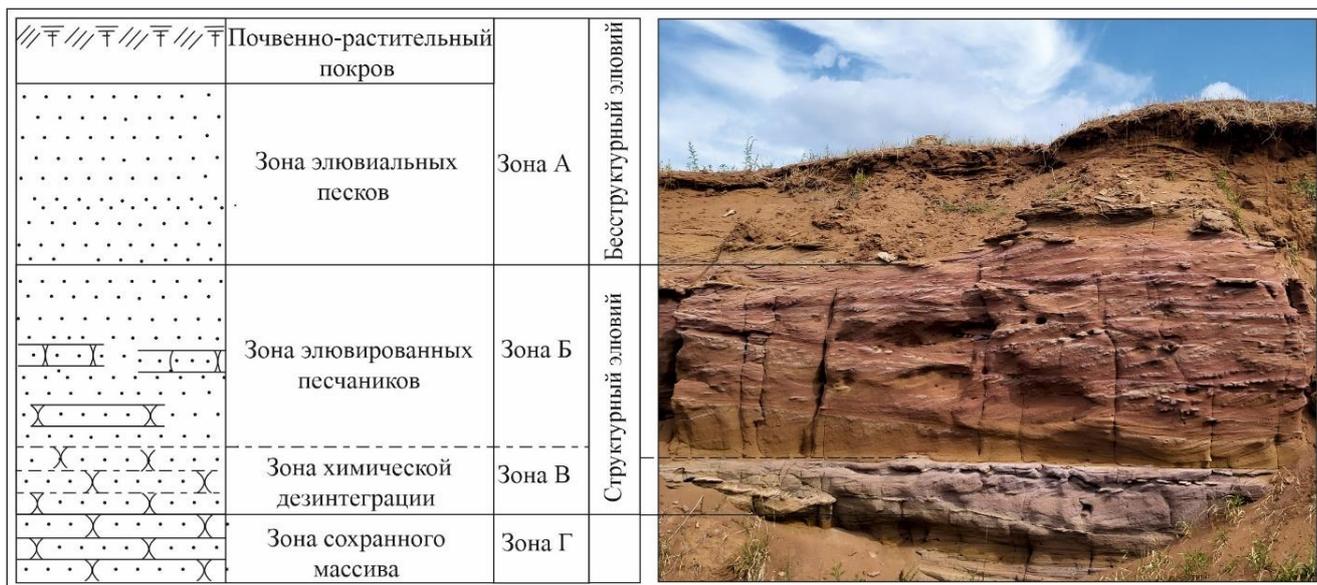


Рис. 6. Зональность преобразования песчаников

В неизменном состоянии песчаники зоны сохранного массива (Зона Г) обладают плотным сложением, по механическим свойствам соответствуют параметрам скальных грунтов. Согласно ГОСТ 25100–2020 песчаники сохранного массива классифицируются как грунты средней прочности и прочные с пределом прочности на одноосное сжатие 17,6–78,5 МПа, плотные (средняя плотность 2,1–2,4 г/см³), пористость 14,1–19,3 %. По минеральному составу породы относятся к граувакковым песчаникам, известковистым, слабглинистым. По данным рентгенографического анализа они сложены кварцем (32–34 %), альбитом (24–26 %), микроклином (12–15 %), мусковитом (9–11 %), кальцитом (15–18 %), смешанно-слоистой иллит-монтмориллонитовой фазой (3–5 %), хлоритом (2–3 %), каолинитом (~1 %) и гематитом (~1 %). Кварц, альбит, микроклин и мусковит относятся к обломочному компоненту породы, кальцит – к цементирующему веществу. Глинистые минералы представлены смешанно-слоистой иллит-монтмориллонитовой разностью, хлоритом и каолинитом. Гематит является продуктом окисления железистых минералов. Песчаник по структуре средне- и мелкозернистый, реже тонкозернистый, алевритистый, с косослоистой текстурой.

Порода сложена на 80–85 % обломочным компонентом, на 15–20 % цементирующим минеральным веществом. Обломочная часть имеет размеры от 0,05 до 0,25 мм и представлена окатанными обломками кремнистых и эффузивных пород (70 %), угловатыми зернами кварца (25 %), чешуйками мусковита (5 %). Обломки горных пород и минералов соединены кальцитовым цементом с примесью глинистого материала. Цемент базально-порового типа, по структуре тонко-мелкозернистый за счет перекристаллизации. Поры межзерновые, субкапиллярной размерности, выполнены водными растворами, препятствующими проникновению в породы внешних атмосферных вод. Подобные типы песчаников в большинстве карьеров слагают либо нижнюю, неизмененную часть разрезов, либо образуют столбообразные реликтовые останцы в гипергенно измененных массивах терригенных пород. С точки зрения строения профиля выветривания они являются материнскими субстратом, по которому развиваются элювиальные отложения (зона сохранного массива).

Процесс изменения строения песчаников различных зон продемонстрирован на рис. 7.

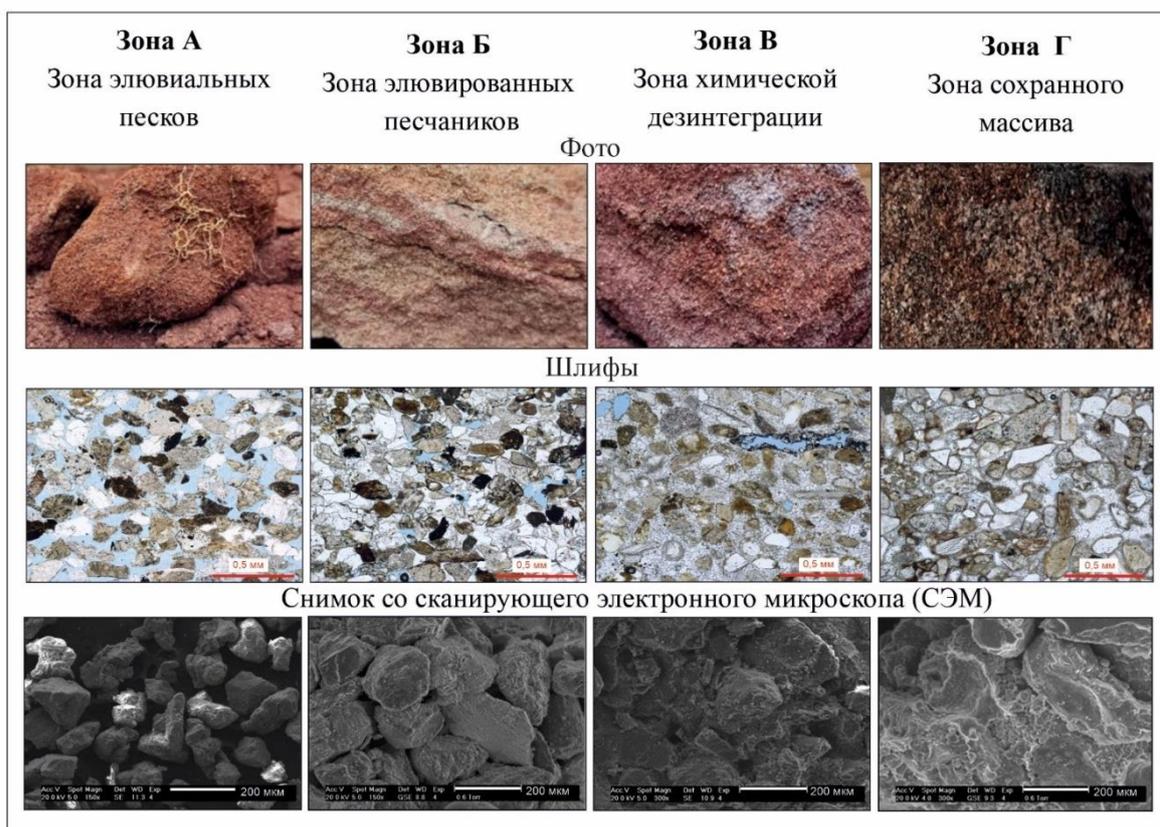


Рис. 7. Изменение строения песчаников различных зон преобразования

На неизмененных песчаниках залегает нечетко выраженная зона дезинтеграции профиля выветривания мощностью от 0,4 до 0,6 м (зона В). Она сложена многочисленными глыбами, щебнем и дресвой из реликтовых фрагментов сцементированных исходных пород в окружении слабосцементированного, разуплотненного до рыхлого сложения песчаника. Обособленные куски реликтов по периферии несут следы выщелачивания. Слабо скрепленные аллотигенные обломки горных пород и минералов легко осыпаются с их поверхности при незначительном механическом воздействии руками. Снизу вверх по разрезу наблюдается последовательное уменьшение размеров реликтовых кусков песчаников, сопровождающееся повышением доли слабосцементированной разрыхленной породы. Оптико-микроскопические исследования целиков зоны дезинтеграции показали, что в них прошел избирательный процесс выщелачивания. Обломки горных пород и минералов остались неизменными, даже их положение в объеме породы не претерпело коррекций.

При этом на локальных участках кальцитовый цемент выщелочен с образованием пор-каверн размером до 1 мм, в ряде случаев сохранившись в виде оторочек по периферии обломочных зерен. Наблюдается тенденция сохранения большей толщины кальцитовой оторочки с увеличением содержания в них глинистого материала. Очевидно, наличие в кальцитовом цементе глинистых минералов снижает интенсивность его выщелачивания агрессивными инфильтрационными водами атмосферных осадков.

Лабораторные исследования образцов, отобранных из этой зоны, показал, что их предел прочности на одноосное сжатие несколько ниже характерных для зоны Г и находится в интервале 13,2–46,3 МПа. Плотность равна 2,02–2,34 г/см³, пористость составляет 12–19%.

Над зоной химической дезинтеграции выше по разрезу залегает зона элювированных песчаников (зона Б), мощность которой может достигать до 20 м.

Необходимо отметить, что термин «элювированный песчаник» введен В. Н. Швановым (1969) и характеризует состояние массива, при котором породы претерпели процессы химического или физического выветривания, но сохранили при этом текстурные признаки, свойственные исходной материнской породе.

Песчаники зоны Б сохранили первичную косослоистую текстуру (хорошо различаемую на рис. 6), что не позволяет считать их классическим элювием. В пределах этой зоны из песчаников практически полностью выщелочен кальцитовый цемент. Его фрагменты отмечаются в локальных участках породы на контактах соприкасающихся зерен минерального скелета. В отличие от исходного песчаника, у которого обломки горных пород и минералов не взаимодействуют между собой, а «плавают» в кальцитовом цементе, в зоне выщелачивания обломочные зерна контактируют друг с другом боковыми поверхностями (рис. 7). За счет постепенного сближения зерен у них сформировались точечные контакты с механическим типом связи, чему в немалой степени способствовали шероховатость частиц кремнистых и эффузивных горных пород и угловатость кварцевых зерен. Одновременно с перемещением минеральных обломков произошло перераспределение глинистого материала. Инфильтрующиеся воды, смачивая глинистые минералы, способствовали их агрегированию и вторичной аккумуляции либо на контактах минеральных частиц, либо на шероховатых поверхностях обломков горных пород.

Таким образом, в песчаниках сформировались, наряду с механическим, и коагуляционные типы контактов. Глинистые агрегаты, обладая высокой сорбционной активностью, осаждали на поверхности из поровых растворов коллоидные соединения гидроксидов железа. Со временем, по мере «старения» коллоидов, гидроксиды преобразовались в гематит, увеличивая силу структурных связей между минеральными частицами в породе. Оптико-микроскопические исследования разуплотненных песчаников показали, что в пределах всего разреза породы характеризуются рыхлой структурной упаковкой. Минеральные частицы скелета взаимодействуют друг с другом через точечные контакты и мостики из глинистых агрегатов. За счет слабых структурных связей терригенные породы зоны выщелачивания легко рассыпаются при незначительном механическом воздействии.

Следует сказать, что зона элювированного песчаника не является абсолютно однородной в разрезах. В стенках исследованных карьеров отмечаются следы существования древних водоносных горизонтов, чаще всего грунтовых вод. Зеркало ранее существовавших грунтовых вод хорошо отбивается по темно-бурым лимонитовым конкрециям, расположенным на одном латеральном уровне в стенках карьеров. Присутствие аутигенных железистых агрегатов в разуплотненных до пористости 35–45 % песчаниках связано с проникновением в массивы терригенных пород вод заболоченных поверхностных водоемов. Вероятно, инфильтрация началась в плейстоцене, когда территория Восточного Закамья входила в состав обширной перигляциальной зоны, и закончилась в голоцене. Выведенные на уровень денудационного среза песчаники казанского яруса, по-видимому, являлись в тот период областями подземного стока для заболоченных водоемов. Пресные воды, обогащенные миграционно-способными соединениями железа, достигнув поверхности неизмененных плотных известковистых песчаников, образовывали водоносные горизонты грунтовых вод. При этом на уровне положения зеркала грунтовых вод активизировались процессы вторичного переотложения железистых соединений с образованием рудного горизонта. Постепенно растворяя кальцит песчаников, уровень ложа грунтовых вод понижался, и процесс

формирования рудного горизонта вновь начинался ниже по разрезу разуплотненных песчаников. Таким образом, в разрезе массива элювированных песчаников могло сформироваться до трех латерально выдержанных слоев, представленных разобщенными лимонитовыми конкрециями.

С инженерно-геологической точки зрения зона элювированных песчаников является наиболее проблемной при выполнении инженерных изысканий и принятии проектных решений. Неравномерность выщелачивания цемента и, соответственно, неоднородность прочностных и деформационных свойств грунтов, часто несистемная и потому труднопрогнозируемая, проблематичность отбора образцов ненарушенного сложения, отсутствие корреляционных зависимостей между данными полевых и лабораторных исследований часто приводят к усложнению проведения инженерно-геологических изысканий и принятию ошибочных решений. Кроме того, маршрутные обследования показали, что в геологическом строении элювия по песчаникам именно песчаники зоны Б имеют преобладающие мощности, достигающие 20 м.

Несмотря на внешнюю схожесть выветрелых песчаников зоны Б с дисперсными песками, структурно-текстурные особенности таких массивов, описанные выше, предопределяют различия в реакции на механическое воздействие, что выражаются в существенном отклонении их свойств от ожидаемых.

Проблематичность отбора образцов ненарушенного сложения песчаников зоны Б при выполнении инженерно-геологических изысканий предопределяет возможность широкого использования полевых методов оценки прочностных и деформационных характеристик, в частности статического зондирования как наиболее доступного и широко распространенного. При этом эффективность интерпретации получаемых результатов свойств грунтов существенным образом зависит от наличия корреляционных зависимостей между параметрами зондирования и значениями определяемых характеристик. При изучении элювированных песчаников сделано 180 точек статического зондирования на участках нижнего и среднего плато, где мощность элювированных песчаников является достаточной для получения статистически обоснованных данных. Пример результата статистической обработки материалов приведен в табл. 1.

Табл. 1

Результаты статистической обработки показателей свойств элювированных тонкозернистых песчаников по данным статического зондирования

Количество определений	Удельное лобовое сопротивление	Удельное лобовое сопротивление, среднее	Коэффициент вариации	Удельное сцепление	Удельное сцепление, среднее	Коэффициент вариации	Угол внутреннего трения	Угол внутреннего трения средний	Коэффициент вариации	Модуль деформации,	Модуль деформации, средний	Коэффициент вариации
шт.	МПа	МПа		кПа	кПа		градус	градус		МПа	МПа	
2464	2,3 ÷ 27	14,4	0,27	16 ÷ 59	32	0,12	16 ÷ 30	22	0,1	7 ÷ 21	14,5	0,27

На основании полученных результатов построены отдельные корреляционные зависимости для модуля деформации E, угла внутреннего трения, удельного сцепления, показателя текучести и др. Пример таких зависимостей показан на рис. 8.

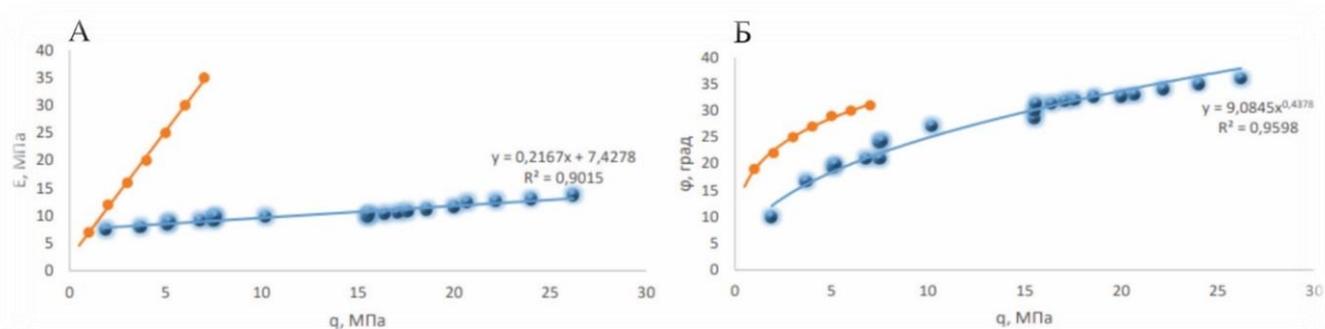


Рис. 8. Экспериментальные (синие линии) и нормативные (красные линии) зависимости модуля деформации E (А) и угла внутреннего трения (Б) от удельного лобового сопротивления зондированию q_c для тонкозернистого песчаника

Наиболее существенные расхождения с нормативными характеристиками имеют деформационные значения. Несмотря на наличие отдельных высоких показателей удельного лобового сопротивления до 27 МПа, максимальное значение модуля деформации не превышает 18 МПа (рис. 8). Это хорошо подтверждается испытаниями массивов песчаников плоскими и винтовыми штампами.

На основании анализа данных статического зондирования разработана таблица, в которой определена плотность сложения песчаников различного гранулометрического состава в зависимости от нормативных значений удельного сопротивления внедрению конуса q_c (табл. 2).

Табл. 2

Плотность сложения песчаников по данным статического зондирования

Песчаники	Разновидность грунта при q_c , МПа		
	Очень плотные и плотные	Средней плотности	Низкой плотности
Среднезернистые (независимо от влажности)	> 16	7–16	< 7
Мелкозернистые (независимо от влажности)	> 14	6–14	< 6
Тонкозернистые: неводонасыщенные	> 12	4–12	< 4
водонасыщенные	> 10	3–10	< 3

Сравнение с аналогичными по гранулометрическому составу песками показывает смещение значений удельного сопротивления практически в каждой области в большую сторону, что объясняется наличием цемента в структуре песчаников. Наличие цемента в структуре песчаника, пусть и по большей части слабого, приводит к тому, что внедрение зонда в массив становится более сложным, что и находит отклик в увеличении значения удельного лобового сопротивления. Причем реальная плотность оказывается ниже, а деформативность выше ожидаемых. В этой связи особенно опасным с практической точки зрения является расчет несущей способности и осадок забивных свай по данным статического зондирования, т. к. в процессе забивки свай происходит разрушение цемента и, как следствие, значительно ухудшаются прочностные и деформационные свойства грунтового массива.

В табл. 3–5 представлены нормативные значения модуля деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления соответственно, определенные на основании статистической обработки 1762 точек статического зондирования.

Табл. 3

Нормативные значения модуля деформации для песчаников по данным статического зондирования														
Вид грунта	Нормативный модуль деформации E_n при q_c , МПа													
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Среднезернистые (независимо от влажности)	12	15	18	19	21	22	23	25	25	26	28	30	-	-
Мелкозернистые (независимо от влажности)	11	14	16	16	18	20	21	22	23	24	25	26	28	-
Тонкозернистые:														
неводонасыщенные	8	9	10	11	12	12	13	13	14	15	16	17	18	21
водонасыщенные	7	8	8	9	10	10	11	11	12	13	13	15	16	18

Табл. 4

Нормативные значения угла внутреннего трения для песчаников по данным статического зондирования												
Вид грунта	Нормативный угол внутреннего трения φ_n при q_c , град.											
	2	3	4	5	9	13	17	21	25	28		
Среднезернистые (независимо от влажности)	22	23	25	26	27	27	29	33	-	-		
Мелкозернистые (независимо от влажности)	21	23	23	24	25	26	28	30	32	-		
Тонкозернистые:												
неводонасыщенные	17	20	22	23	25	26	27	27	29	30		
водонасыщенные	16	18	21	21	23	24	25	26	27	29		

Табл. 5

Нормативные значения удельного сцепления для песчаников по данным статического зондирования											
Вид грунта	Нормативное удельное сцепление c_n при q_c , град.										
	2	3	4	5	9	13	17	21	25	28	
Среднезернистые (независимо от влажности)	14	17	20	25	28	30	33	35	-	-	
Мелкозернистые (независимо от влажности)	15	18	21	27	32	34	36	37	38	-	
Тонкозернистые:											
неводонасыщенные	17	20	24	30	35	42	48	52	57	59	
водонасыщенные	16	18	22	28	34	40	46	51	55	57	

При выполнении инженерных изысканий на территориях, сложенных элювиальными грунтами, трудность вызывает их диагностика, особенно в плане отличия от песков. Так как отбор образцов ненарушенного сложения зачастую невозможен, перспективной является идентификация разновидностей грунтов на основании данных статического зондирования. Подобная процедура впервые в изыскательской практике предложена М. П. Бегеманном (1965). В настоящий момент наиболее популярным для классификационного выделения грунтов является определение фрикционного отношения R_f , равного отношению сопротивления по боковой поверхности f_s к сопротивлению по лобовой поверхности q_c , согласно формуле (1):

$$R_f = \frac{f_s}{q_c}. \quad (1)$$

В табл. 6 показаны q_c и R_f для некоторых разновидностей песков и песчаников на территории Восточного Закамья, а также приведены значения для карбонатных и глинистых грунтов, анализ которых выполнен ниже.

Идентификация разновидностей грунтов по удельному сопротивлению грунта внедрению конуса q_c и фрикционному отношению R_f (глубина исследования до 20 м)

Возможный вид грунта	Выборка, n	Удельное сопротивление грунта внедрению конуса q_c , МПа	Фрикционное отношение R_f , %	$\frac{Cv(q_c)}{Cv(R_f)}$
Песок крупный и гравелистый	46	8–18	4–8	0,14
		11,7	6,6	0,13
Песок средней крупности	56	6,5–14,8	3–9,5	0,23
		9,2	6,5	0,27
Песок мелкий	56	2,5–6,5	0,5–4	0,20
		3,8	1,9	0,39
Элювированный песчаник	47	7,5–15	11,4–19,5	0,16
		10	15,2	0,11
Элювиальный песок	29	0,4–0,9	0,3–2,5	0,17
		0,68	1,24	0,43
Дресвяно-щебнистый грунт	29	17–42	9–19	0,20
		25,8	12,2	0,16
Карбонатная мука	52	1,2–2,4	0,6–6	0,14
		1,7	2,6	0,51
Среднепермская глина	56	2,1–4,3	1–8	0,17
		2,7	3	0,48
Четвертичная глина	52	0,8–1,5	1–6	0,14
		1,1	2,8	0,42
Элювированная глина	47	0,6–1	3–7	0,14
		0,8	4,3	0,22
Элювиальная глина	56	0,3–0,7	4–9	0,18
		0,5	5,9	0,18

Примечание: В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение (выборочное); Cv – коэффициент вариации.

На основании полученных данных построена диаграмма рассеяния, на которой четко прослеживается тенденция разделения грунтов (рис. 9).

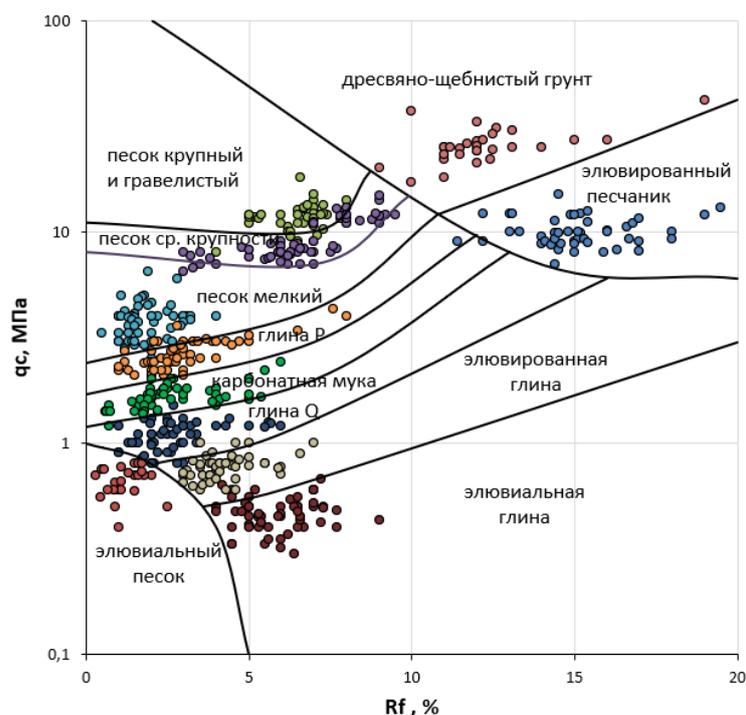


Рис. 9. Сводная диаграмма разновидностей для песков и песчаников на территории Восточного Закамья

Элювированные песчаники, как видим, занимают достаточно четко выраженную зону, характеризующуюся диапазоном 7,5–15 МПа для удельного сопротивления грунта внедрению конуса и 11,4–19,5 % для фрикционного отношения. У элювиального песка эти значения составляют 0,4–0,9 МПа и 0,3–2,5 % соответственно. Таким образом, метод статического зондирования грунтов может быть эффективно использован для выделения песчаников в толще грунтового массива.

Сопоставление с классической диаграммой Робертсона (2010) показывает: в целом прослеживаются общие тренды положения зон в зависимости от пористости, крупности частиц, содержания органического вещества, но полученная в ходе настоящего исследования диаграмма имеет гораздо более конкретный характер. (Полный анализ см. в диссертации.)

Разрезы массивов терригенных пород казанского яруса венчают элювиальные пески, развивающиеся по кровле разуплотненных песчаников зоны выщелачивания. Мощность элювиального слоя, как правило, небольшая, варьирует от 0,2 до 0,6 м, поэтому инженерно-геологическая характеристика песков этой зоны не была выполнена, за исключением определения их гранулометрического состава и оценки суффозионности. Отсутствие более мощных элювиальных покровов объясняется постоянным сносом рыхлых песков в ближайшие понижения рельефа и речные долины. В отличие от подстилающих песчаников, характеризуются отсутствием первичной косослоистой текстуры, более плотным сложением, несколько большим содержанием глинистого материала, полным отсутствием кальцитового цемента. Находясь в зоне с контрастными перепадами температур и влажности, обломочные зерна приобрели более устойчивую структурную упаковку, приближенную к ромбоэдрической. Между обломками горных пород и минералов преобладают механические контакты структурных связей. Глинистые минералы постоянно удаляются транзитными поверхностными водными потоками.

Сведения о минеральном составе песчаников различных зон приведены в табл. 7.

Табл. 7

Минеральный состав песчаников на территории Восточного Закамья

Литология	Минеральный состав, вес. %									
	Кальцит	Доломит	Гематит	Каолинит	Роговая обманка	Мусковит	Смешанно-слоистые	Альбит	Микроклин	Кварц
Зона А Зона элювиальных песков (30 образцов)	-	-	$\frac{1 \div 3}{2}$	$\frac{1 \div 5}{3}$	$\frac{1 \div 3}{2}$	$\frac{2 \div 8}{4}$	$\frac{14 \div 18}{17}$	$\frac{22 \div 34}{28}$	$\frac{12 \div 20}{12}$	$\frac{28 \div 39}{32}$
Зона Б Зона элювированных песчаников (30 образцов)	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 4}{3}$	$\frac{18 \div 26}{21}$	$\frac{28 \div 34}{30}$	$\frac{6 \div 10}{8}$	$\frac{30 \div 38}{33}$
Зона В Зона химической дезинтеграции (30 образцов)	$\frac{3 \div 12}{6}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{2 \div 5}{3}$	$\frac{4 \div 10}{8}$	$\frac{26 \div 34}{30}$	$\frac{6 \div 10}{8}$	$\frac{38 \div 45}{41}$
Зона Г Зона сохранного массива (30 образцов)	$\frac{28 \div 35}{30}$	$\frac{1 \div 3}{2}$	$\frac{1 \div 3}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{1 \div 3}{1}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{3 \div 8}{5}$	$\frac{9 \div 18}{12}$	$\frac{1 \div 3}{2}$	$\frac{35 \div 48}{45}$

Примечание: В числителе указан диапазон изменения, в знаменателе – среднее значение.

Четко прослеживается тенденция резкого снижения содержания кальцита в зоне В по сравнению с зоной Г и его практически полного отсутствия в зонах А и Б.

Таким образом, процесс химического выветривания в песчаниках можно охарактеризовать протеканием процесса растворения карбонатов:

- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{HCO}_3^-$;
- $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$;
- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$.

Рассмотрение стадийности изменений массивов песчаников показывает, что основным движущим процессом их гипергенного преобразования является выщелачивание кальцитового цемента. В результате этого первичный цементационный тип структуры сменяется смешанной коагуляционной и механической. Особенностью процесса выветривания песчаников казанского яруса является относительная сохранность положения минеральных частиц в объеме породного массива, устойчивость их структурных и текстурных особенностей, приобретенных на стадии седиментации и прогрессивного литогенеза. По существу, частично меняется лишь минеральный состав пород за счет удаления кальцита из их порового пространства. Конкурирующий процесс цементации минеральных частиц гидроксидами железа сказывается на увеличении сил сцепления в скелете песчаника и практически не действует на другие свойства элювированных пород.

Влияние климатических факторов на дезинтеграцию песчаников оценивалось проведением испытаний образцов кубической формы размерами 50×50 мм на холодоустойчивость. За основу взят базовый метод – замораживание образцов, предварительно насыщенных водой, с дальнейшим их оттаиванием в воде согласно следующему порядку: охлаждение при температуре -18 ± 2 °С в течение 24 часов, а затем размораживание при температуре 20 ± 5 °С не менее чем 2 часа. Разрушение образцов, что отбирались для исследования на 16 различных участках среднего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности (по пять – на каждом), сопровождалось уменьшением размеров, массы и плотности соответственно.

Для образцов песчаника, выдержавших многократные циклы замораживания и оттаивания, определен коэффициент морозостойкости $K_{\text{мрз}}$ по формуле (2):

$$K_{\text{мрз}} = \frac{R_{\text{мрз}}}{R_c}, \quad (2)$$

где $R_{\text{мрз}}$ – предел прочности при сжатии образца после испытания на замораживание и оттаивание, R_c – предел прочности на одноосное сжатие образца, не подвергнутого испытанию.

Проведение исследования показало, что песчаники зоны сохранный массива за редким исключением могут быть классифицированы как морозостойкие ($K_{\text{мрз}}$ равен 0,80–0,98). В табл. 8 представлены результаты испытаний 5 образцов песчаников, отобранных возле населенных пунктов Альметьевск и Муслумово.

Доля образцов, не выдержавших испытание на морозостойкость, составила 13,3 %, или 12 образцов из общего количества, равного 90 шт., тем самым подтверждая тезис о том, что при гипергенном изменении песчаников преобладающими являются процессы химического выветривания.

Результаты испытаний образцов песчаников зоны сохранный массива на морозостойкость

№ образца	Разрушающая нагрузка, кН	Площадь поверхности разрушения образца, см ²	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Коэффициент морозостойкости
	R	F	R _c	K _{мпз}
Исходный образец	9,53	25,08	38	-
1.1	8,18	25,48	32,1	0,84
1.2	8,32	25,01	33,25	0,88
1.3	8,91	25,04	35,60	0,94
1.4	7,85	25,73	30,52	0,80
1.5	7,93	25,08	31,60	0,83
Исходный образец	3,20	25,92	12,33	-
2.1	3,01	25,22	11,94	0,97
2.2	2,56	24,09	10,63	0,86
2.3	2,71	25,92	10,44	0,85
2.4	2,62	25,50	10,29	0,83
2.5	2,55	24,89	10,24	0,83

Элювий по глинистым породам на территории Восточного Закамья развивается преимущественно на поверхности нижнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности и Камско-Бельской низменности. Гипергенным процессам подвергаются глинистые породы уржумского яруса.

Согласно выполненным исследованиям в профиле гипергенеза можно выделить три зоны: зону неизменных пород, зону элювированных глин и зону элювиальных глин (рис. 10).



Рис. 10. Зональность преобразования глин

Неизменные глины по составу глинистой компоненты полиминеральные. В них преобладают смешанно-слоистая минеральная разность иллит-монтмориллонитового состава и иллит, в меньшей степени содержится хлорит. Совместно с глинистыми минералами в неизменных глинах присутствуют кальцит, доломит и гипс (15–20%). Аллотигенная часть, в сумме составляющая 40–55%, представлена обломками кварца, полевых шпатов, кремнистых и эффузивных пород. Минеральные компоненты имеют плотную структурную упаковку в породе, что обуславливает

невозможность проникновения в них инфильтрационных вод, кроме как по трещинам. Наличие седиментационно-диагенетических карбонатов увеличивает механические свойства глин за счет образования кристаллизационных структурных связей с глинистыми частичками. В породе присутствует 10–15 % обломочных минералов, представленных тонкоалевритовыми зернами кварца, полевых шпатов и чешуек мусковита. Аллотигенные минералы равномерно рассеяны в породе, а в некоторых участках сконцентрированы в мало протяженные линзочки толщиной до 0,1 мм.

В зоне Б выделен слой глин, названных элювированными. В инженерной геологии отсутствует как таковое понятие «элювированная глина». Использование этого термина предлагается по аналогии с песчаниками для обозначения дочетвертичных слоистых аргиллитоподобных глин, обладающих текстурными признаками исходной породы и имеющих признаки физического выветривания (трещиноватость, оскольчатость).

В элювированной зоне глинистые породы претерпели дезинтеграцию. Под действием отрицательных температур в период валдайского оледенения глины с поверхности подверглись растрескиванию. На некоторых участках в стенках котлованов фиксируются следы клиновидных морозобойных трещин глубиной более 2 м, которые заполнены бурыми лессовидными суглинками. К зоне четвертичного промерзания приурочена интенсивная раздробленность глинистых пород, осложненная экзогенной складчатостью. Часть разобщенных обломков подверглась процессам диспергации. Рыхлый глинистый материал послужил своего рода цементом, скрепляющим щебнисто-дресвяные фрагменты исходной глинистой породы. Разуплотнение глины в зоне элювирования способствовало более интенсивному проникновению в нее вод атмосферных осадков. Это содействовало активизации химических процессов выветривания. Агрессивные инфильтрационные воды полностью или частично выщелочили доломит, кальцит и гипс из дезинтегрированных пермских глин, запустили реакцию гидролиза полевых шпатов. Последнее выразилось в виде уменьшения доли микроклина и появления в составе глинистых минералов каолинита. Сведения о минеральном составе глин различных зон представлены в табл. 9.

Табл. 9

Минеральный состав глин на территории Восточного Закамья

Литология	Минеральный состав, вес. %									
	Кальцит	Гипс	Гематит	Каолинит	Мусковит	Клинохлор	Смешанно-слоистые	Альбит	Микроклин	Кварц
Зона А Зона элювиальных глин (30 образцов)	-	-	$\frac{1 \div 3}{1}$	$\frac{1 \div 6}{4}$	$\frac{2 \div 8}{5}$	$\frac{5 \div 10}{4}$	$\frac{32 \div 40}{32}$	$\frac{18 \div 25}{21}$	$\frac{6 \div 10}{9}$	$\frac{21 \div 26}{24}$
Зона Б Зона элювированных глин (30 образцов)	-	-	$\frac{1 \div 2}{1}$	$\frac{5 \div 10}{8}$	$\frac{5 \div 12}{8}$	$\frac{3 \div 8}{5}$	$\frac{18 \div 26}{21}$	$\frac{21 \div 34}{28}$	$\frac{6 \div 14}{10}$	$\frac{18 \div 26}{19}$
Зона Г Зона сохранного массива (30 образцов)	$\frac{5 \div 18}{12}$	$\frac{4 \div 8}{6}$	$\frac{1 \div 2}{1}$	-	$\frac{5 \div 10}{7}$	-	$\frac{12 \div 19}{16}$	$\frac{28 \div 32}{30}$	$\frac{8 \div 16}{11}$	$\frac{12 \div 23}{17}$

Примечание: В числителе указан диапазон изменения, в знаменателе – среднее значение.

В зонах А и Б, как видим, полностью отсутствуют кальцит и гипс, снижается содержание альбита по сравнению с зоной Г и появляется каолинит. Зона элювиальных глин имеет значительно меньшую мощность по сравнению с элювированными глинами и на большей части территории

Восточного Закамья размыта. От элювированных глин элювиальные глины отличаются тем, что они полностью потеряли текстурные признаки и представляют собой, по сути, рыхлую глинистую массу, часто разрушенную корневой системой растений. В профиле выветривания элювиальная глина выделяется более светлым окрасом, что обусловлено вымыванием соединений $\text{Fe}(\text{OH})_3$ атмосферными осадками, обогащающимися CO_2 , содержащимся в почвенно-растительном слое.

Процесс изменения строения глин различных зон показан на рис. 11.

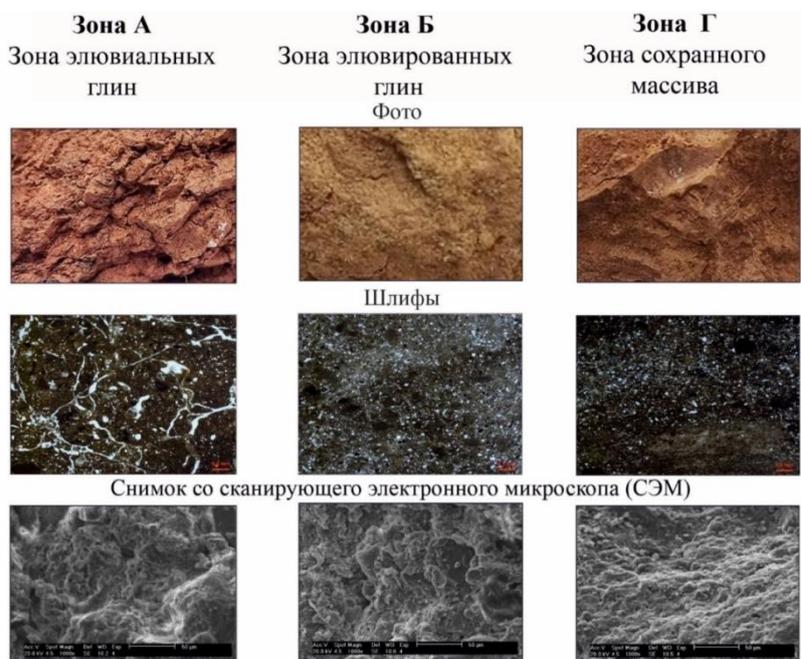


Рис. 11. Изменение строения глин различных зон преобразования

Таким образом, процесс химического выветривания в глинах можно охарактеризовать протеканием процесса растворения карбонатов:

- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{HCO}_3^-$;
- $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$;
- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$,

а также преобразованием альбита в каолинит:

- $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] + \text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4 + \text{Na}(\text{HCO}_3) + \text{H}_4\text{SiO}_4 + 3\text{H}^+$.

С практической точки зрения полученные результаты изменения минерального и химического состава дают основание сформулировать один из диагностических критериев выделения элювиальных и элювированных глин в профиле выветривания. Для глин Восточного Закамья установлено, что среднее содержание кальцита и гипса в материнской породе 12 и 6 % (при минимальных значениях 5 и 4%) соответственно. В зоне элювированной глины в результате выветривания происходит полное выщелачивание кальцита и гипса. В рамках производственных лабораторий наиболее доступным является определение карбонатности глин. Исследование выборки из 90 образцов позволяет говорить о том, что содержание карбонатов менее 7 % следует считать граничным количественным критерием выделения элювированных глин.

Физико-механические свойства глин изучены на 53 образцах элювированных глин и на 31 образце глин зоны сохранного массива. На рис. 12 и 13 приведены зависимости нормативных

значений одометрического модуля деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления от коэффициента пористости.

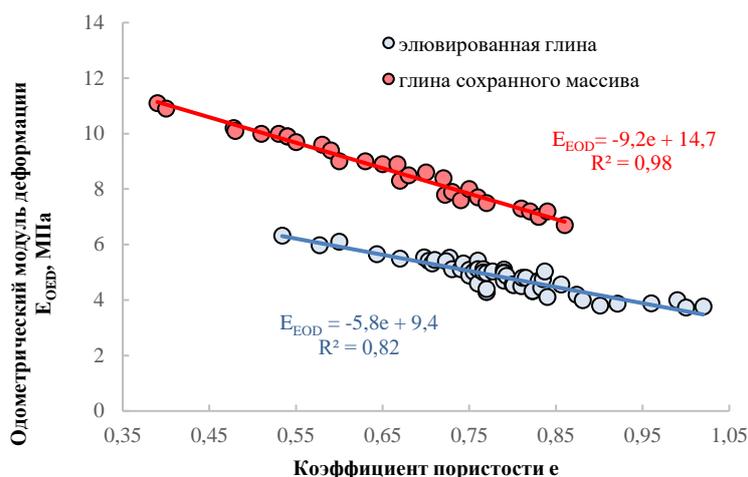


Рис. 12. Зависимость нормативных значений одометрического модуля деформации глин от коэффициента пористости

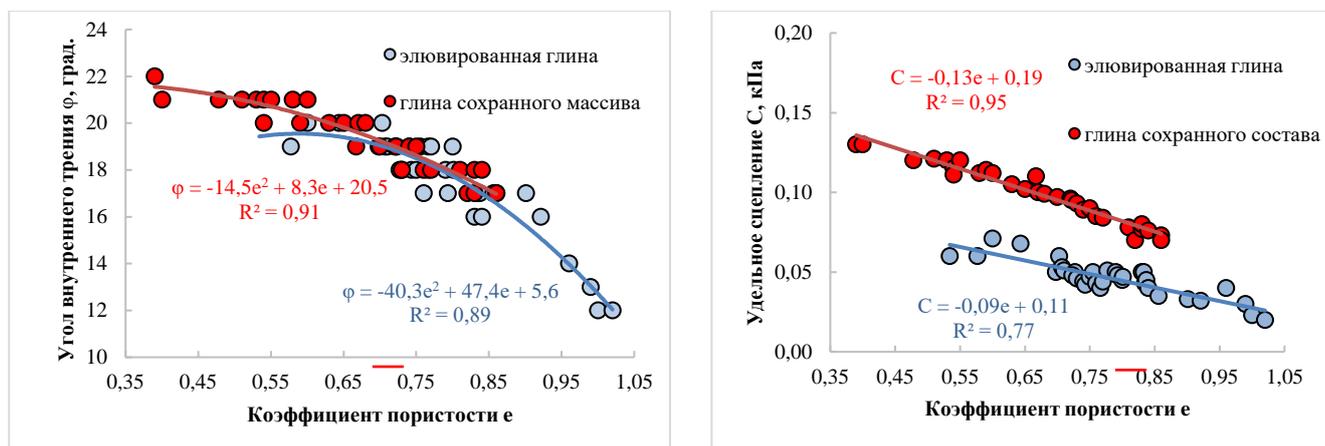


Рис. 13. Зависимость нормативных значений угла внутреннего трения и удельного сцепления глин от коэффициента пористости

Элювированные глины, как видим, имеют существенно меньшие значения прочностных и деформационных характеристик по сравнению с неизменными глинами.

На всех трех графиках наблюдается смещение диапазона по коэффициенту пористости для элювированных глин, что объясняется их меньшей плотностью по сравнению с глинами зоны сохранный массива. В среднем для большинства проб диапазон изменения коэффициента пористости составляет от 0,68 до 0,93 (46 из 53 образцов). Таким образом, можно готовить об еще одном количественном критерии выделения элювиальных глин от зоны сохранный массива: если значение коэффициента пористости меньше 0,68, то такая глина должна быть отнесена к материнской породе.

Для всех параметров характерен также большой разброс значений, что объясняется неоднородностью преобразований массива элювированных глин в результате выветривания.

На основании полученных зависимостей построена таблица региональных нормативных значений механических характеристик для глин элювированной зоны и зоны сохранный массива (табл. 10).

Табл. 10

Региональные нормативные значения одометрических модулей деформации E_{oedn} , углов внутреннего трения φ_n и удельных сцеплений c_n глинистых грунтов

Наименование грунта	Обозначение характеристик грунтов	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости e , равном						
		0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Элювированная глина	c_n , кПа	-	66	57	49	40	32	-
	φ_n , градус	-	19	19	18	17	14	-
	E_{oedn} , МПа	6,8	6,2	5,6	5,0	4,5	3,9	3,3
Глина зоны сохранного массива	c_n , кПа	128	115	102	89	75	-	-
	φ_n , градус	21	21	20	19	17	-	-
	E_{oedn} , МПа	10,6	9,7	8,8	7,8	6,9	6,0	5,1

Полевые исследования глинистых массивов статическим зондированием показали, что по аналогии с песчаниками диаграмма рассеяния может быть использована для предварительного выделения зон в глинистых массивах. На рис. 9 можно достаточно четко выделить зоны элювированных и элювиальных глин, значительно отличающихся от глин сохранного массива, особенно по значениям удельного сопротивления грунта внедрению конуса, которое находится в диапазоне 2,1–4,3 МПа для неизменных глин, а для элювированных и элювиальных глин 0,6–1 и 0,3–0,7 МПа соответственно.

Третье защищаемое положение

На территории Восточного Закамья элювиальные карбонатные грунты распространены преимущественно в пределах верхнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, а в их разрезе отчетливо обособляются горизонты структурного и бесструктурного элювия, различающихся различной степенью преобразованности материнских пород, механическим и минеральным составом, а также структурно-текстурными признаками. Выделение этих горизонтов должно лежать в основе оценки физико-механических свойств и суффозионной устойчивости карбонатных элювиальных грунтов.

Характерной особенностью строения водоразделов Восточного Закамья, как показано выше, является ступенчатость, обусловленная в первую очередь тектоно-климатическими этапами развития территории. Локально ступени совпадают с пластами прочных горных пород (известняков, песчаников), поэтому являются бронированными. Высокое плато – наиболее четко выраженная ступень, развитая на абс. высотах 280–385 м. Этот ярус рельефа денудационный, срезающий под один уровень различные слои пород уржумского и казанского ярусов верхнего отдела пермской системы. Большинство исследователей признает миоценовый возраст формирования верхнего плато, поскольку в соседних регионах (на Приволжской возвышенности) данный уровень срезает породы вплоть до эоцена и олигоцена.

Выположенные вершины водоразделов на протяжении этапа похолоданий в период развития валдайского оледенения подвергались морозному выветриванию, которое сформировало относительно мощную зону дезинтеграции в верхней части разреза рассматриваемой территории. В это же время достаточно интенсивно проявлялись процессы перемещения пород в результате водно-денудационных процессов. В этапы кратковременных потеплений физическое выветривание ослаблялось, активизировались процессы химического выветривания. Дезинтегрированные

карбонатные породы частично растворились, растворенное минеральное вещество вновь откладывалось в виде кальцитовых натечных корочек на стенках трещин в нижней части профиля зоны гипергенеза.

Преобладающие породы верхнего плато – светло-серые микрозернистые доломиты и известняки казанского и уржумского ярусов мощностью до 10 м, предопределившие образование по ним карбонатного элювия, толщина пласта которого достигает 6 м и убавляется с понижением абс. высот (рис. 14).

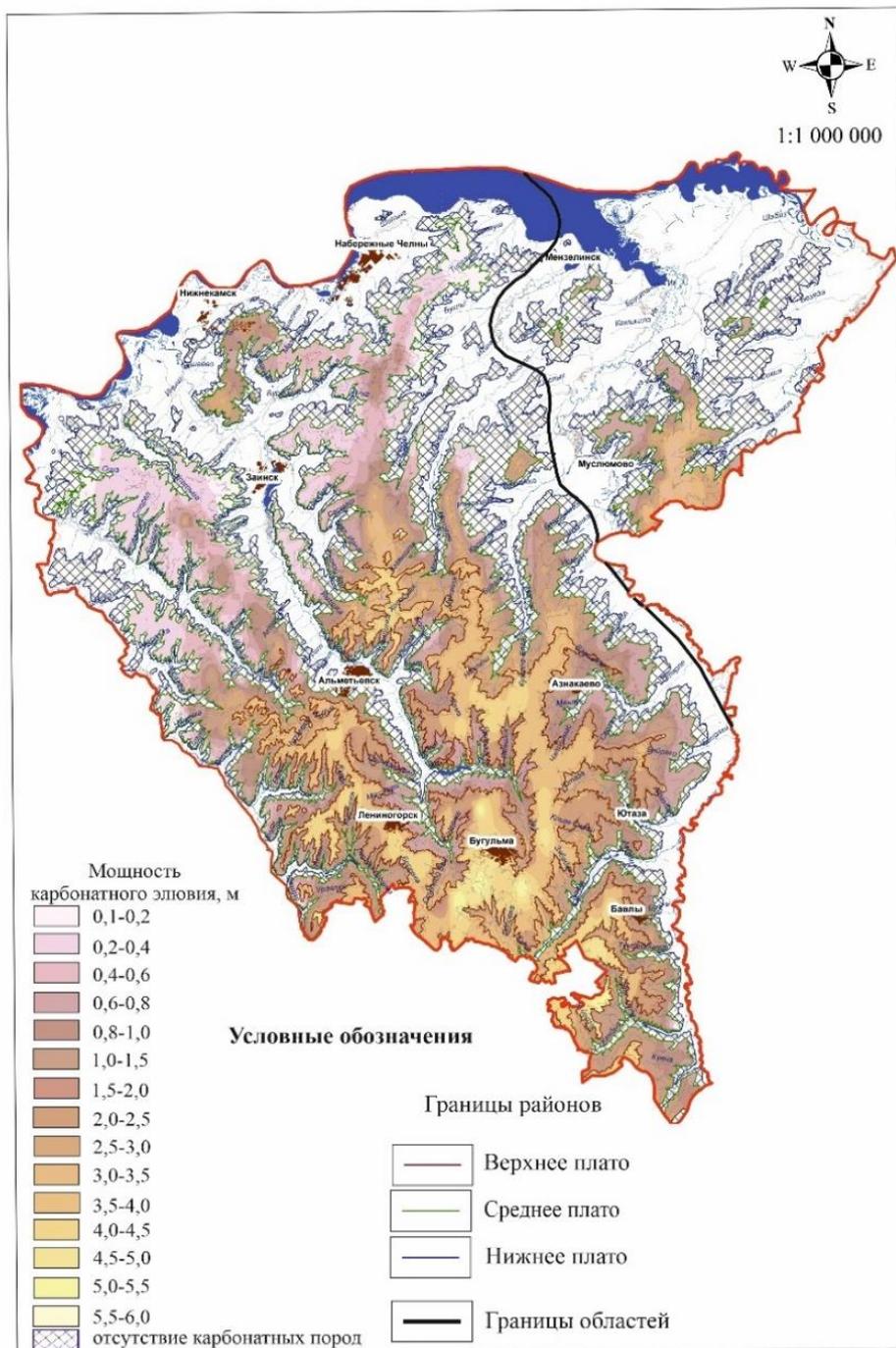


Рис. 14. Карта мощности элювия по карбонатным породам (Латыпов и др.)

Анализ строения профилей выветривания по карбонатным породам верхнего плато показывает, что на всех стенках природных и техногенных обнажений четко обособляются три зоны:

неизменные карбонатные породы, породы структурного элювия и карбонатная мука зоны бесструктурного элювия. Последние две зоны представляют собой единую область дезинтеграции с различной интенсивностью изменения коренных пород. В зоне структурного элювия породы разбиты многочисленными системами горизонтальных и вертикальных трещин на блочные и плитчатые отдельности, которые сохраняют исходный характер залегания в разрезе. Снизу вверх по профилю выветривания размеры отдельностей уменьшаются, переходя в бесструктурный элювий. Последний сложен обломками щебнисто-дресвяной размерности, сцементированными рыхлой белой, серой доломитовой мукой, состоящей из агрегатов (0,05–2 мм) прочно сцепленных ромбоэдрических зерен доломита. Хорошая сохранность габитусных элементов ромбоэдрических кристаллов указывает на механические разрывы структурных связей между зернами при дезинтеграции доломитов (рис. 15). Такое изменение пород возможно только при физических процессах выветривания, когда основным фактором их разрушения являются перепады температур. Циклические перепады температур, вызывающие неравномерные растяжения-сжатия доломитовых зерен, а также эффект замерзающей воды, приводили к возникновению между соприкасающимися кристалликами расклинивающих трещин. Со временем породы рассыпались на более мелкие агрегаты с сохранением у зерен доломита ровных граней и ребер без следов растворения.

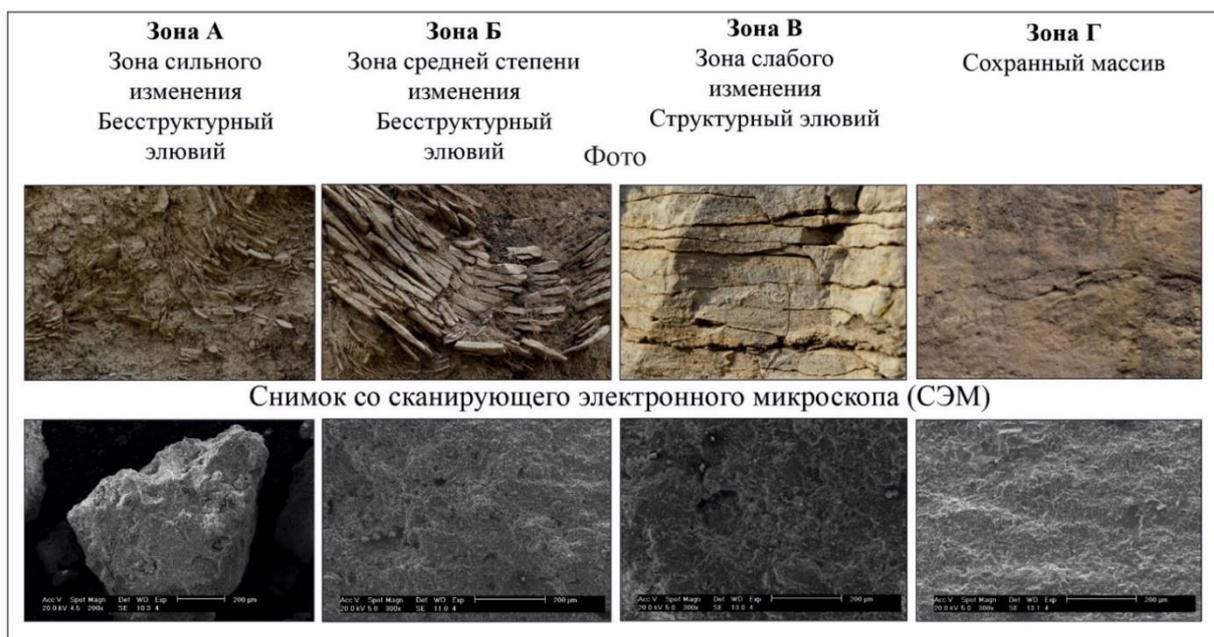


Рис. 15. Изменение строения карбонатных пород различных зон преобразования

Схематическое изображение выделенных зон элювия по карбонатным породам приведено на рис. 16. В основании зоны гипергенного преобразования пород залегают плотные светло-серые массивные карбонатные породы. В стенках карьеров видно, что породы секутся редкими вертикальными трещинами разгрузки, находящимися друг от друга на расстоянии 10–15 м. Над ними залегают карбонатные породы, разбитые на блочные отдельности более многочисленными системами вертикальных и горизонтальных трещин. Снизу вверх размеры блоков в пределах слоя уменьшаются. Если в подошве слой сложен крупноблочными отдельностями (1,5 × 0,6 × 0,8 м), то в верхней части – уже мелкоблочными (0,5 × 0,25 × 0,3 м). Трещины, секущие породу, имеют

раскрытость до 1,5 см. В кровле слоя присутствуют следы вторичной кальцитизации в виде бурых корочек натечного кальцита.

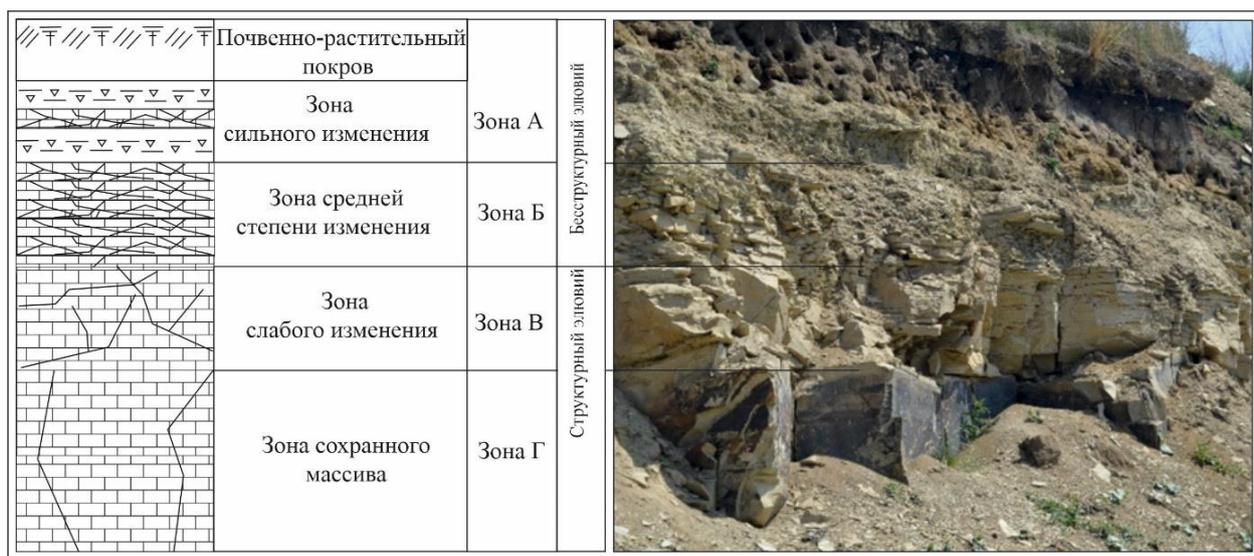


Рис. 16. Зональность преобразования карбонатных пород

Мощность слоя с повышенной трещиноватостью составляет около 4 м. Он представляет собой сохраннный массив, над которым конформно залегает слой плитчатых карбонатных пород. Они светло-серые слабоглинистые, характеризуются микрозернистой структурой и разбиты на плитчатые отдельности системами вертикальных и горизонтальных трещин. В подошве слоя преобладает крупноплитчатая отдельность, в кровле – тонкоплитчатая. Оба слоя образуют структурный элювий, где все плитчатые отдельности находятся в положении, что 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 их размер последовательно снижается, уменьшается содержание псефитовой фракции, увеличивается доля псаммитовой и алевроитовой фракций. Слой несет следы струйчатых суффозионных выносов тонкодисперсного материала и вымываний в образованные полости и понижения красно-бурого глинистого материала. Мощность слоя карбонатной и карбонатно-глинистой муки бесструктурного элювия составляет 1,5–2,5 м. Над ним может залегать слой плитчатых карбонатных пород бесструктурного элювия, при этом плиточки отдельностей в слое легко разбираются на отдельные составляющие. Трещины раскрытостью 0,5–1 см частично заполнены карбонатно-глинистой мукой. Участками в верхней части слоя плитчатые отдельности несут следы деформаций в виде волнообразных изгибов. Их образование обусловлено локальными размывами нижележащих пород с последующим формированием в кровле экзогенной складчатости. Мощность слоя плитчатых карбонатных пород составляет 2–2,5 м. Венчают карбонатный разрез эрозионно-денудационных вершин красно-бурые суглинки, переходящие в темно-серые подзолистые почвы. Толщина терригенных покровных отложений равна 0,4–0,6 м.

С инженерно-геологической точки зрения выявленное строение элювия по карбонатным породам может быть дифференцировано на горизонты структурного и бесструктурного элювия, которые относятся к разным классам дисперсных и скальных грунтов в соответствии с классификацией грунтовых массивов по ГОСТ 25100–2020. Такое разделение предопределяет как

инженерно-геологическое выделение, так и выбор методов исследования грунтовых массивов, сложенных породами структурного и бесструктурного элювия.

Горизонт бесструктурного элювия

Зона А (зона сильного изменения) – это карбонатно-глинистая мука, характеризующаяся рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. На исследованной территории коэффициент неоднородности достигает значения $C_u = 30$. Включения карбонатных пород (дресва и щебень) имеют сильную степень выветрелости, растираются руками и размягчаются в воде.

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

Зона А–I. Минералогический состав данной разновидности характеризуется преобладанием карбонатной составляющей (более 50 %) над глинистым компонентом. Обладает пластичными свойствами ($I_p = 8–12$), показатель текучести варьирует от 0,05 до 0,48. Классификационно соответствует легкому суглинку с полутвердой и тугопластичной консистенцией (ГОСТ 25100–2020). Отдельные пробы по числу пластичности были определены как супеси пластичные (8 % от всех исследований группы). Плотность грунта находится в пределах 1,87–2,05 г/см³. Пористость 31,7–43,3 %. Модуль деформации колеблется в диапазоне 21–49 МПа, угол внутреннего трения составляет 20–27 °, удельное сцепление равно 10–33 кПа.

Зона А–II. Минеральный состав данной разновидности отличается преобладанием глинистого компонента (более 50 %) над карбонатной фракцией. Обладает пластичными свойствами ($I_p = 12–17$). Согласно ГОСТ 25100–2020 соответствует тяжелому суглинку 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 г/см³. Пористость 34,7–50,5 %. Модуль деформации находится в интервале 13–35 МПа, угол внутреннего трения равняется 17–24 °, удельное сцепление составляет 24–48 кПа.

Зона Б (зона средней степени изменения) сложена разобщенными плиточками карбонатных пород, которые разориентированы по отношению друг к другу и размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. На отдельных участках горизонта плиточки налегают одна на другую, в иных – наклонены под углом 5–20° или волнообразно изгибаются, образуя небольшие по амплитуде экзогенные складочки. Разделены плиточки относительно широкими вертикальными и горизонтальными трещинами, заполненными тонкодисперсным карбонатным материалом с включениями дресвы.

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

Горизонт структурного элювия

Зона В (зона слабого изменения) сложена плотными слаботрещинистыми известняками и доломитами. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется

тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей от блочной параллелепipedной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Средняя плотность 2,5–2,7 г/см³, пористость 6,2–10,5 %. Предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 12,4–60,5$ МПа. Породы выветрелые (коэффициент выветрелости $0,8 < K_{вт} < 0,9$). Мощность слоя варьирует от 0,5 до 2,8 м.

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

По результатам литолого-минералогических исследований элювиальные отложения классифицированы на две разновидности современных элювиальных кор выветривания, представленных на рис. 16. В основу подразделения положен минеральный состав коренных пород, по которым развивается зона структурного элювия.

Первая разновидность (Зона В/Б–I) – это тонкослоистые или массивные известняки. Независимо от текстурных признаков все они характеризуются светло-серой окраской с буроватым оттенком за счет ожелезнения, неравномерно-зернистой структурой, линзовидно-слоистой или скрытозернистой текстурой с плотным сложением. Их пористость находится в пределах 5–15 %. Поры выщелачивания межформенные сообщающиеся, образуют извилистые каналы диаметром 0,05–0,1 мм. В неизменном состоянии известняк содержит слойки и линзочки терригенного материала, представленного обломками пород, зернами кварца, полевых шпатов, чешуйками мусковита, иногда 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. 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. Характеризуется 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. Из аутигенных минералов отмечаются редкие агрегаты пирита, а также включения (5 %) органических остатков. Породы содержат 6–9 % пор размерами 0,05–0,1 мм. По границам волнистых слойков фиксируются щелевидные протяженные поровые каналы. Средняя плотность 2,2–2,5 г/см³, пористость 8,2–11,2 %. Водопоглощение 0,34–1,8 %, предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 6,5–55,4$ МПа.

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

Зона сохранного массива

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

Таким образом, в выделенных горизонтах структурного и бесструктурного элювия хорошо

различаются зоны экзогенного изменения известняков и доломитов различного минерального состава и с разными физико-механическими свойствами (табл. 11).

Табл. 11

Минералогический состав карбонатного элювия

Литология	Минеральный состав, вес. %						
	Доломит	Кальцит	Альбит	Кварц	Монтмориллонит	Микроклин	Каолин
Зона Г-I Сохранный массив Известняк (30 образцов)		$\frac{92 \div 98}{95}$		$\frac{2 \div 4}{2}$		$\frac{2 \div 4}{3}$	
Зона Г-II Сохранный массив Доломит (30 образцов)	$\frac{89 \div 96}{93}$	$\frac{2 \div 7}{3}$		$\frac{2 \div 6}{4}$			
Зона В/Б-I Горизонт структурного элювия / Горизонт бесструктурного элювия Известняк (30 образцов)		$\frac{88 \div 96}{92}$	$\frac{2 \div 6}{4}$	$\frac{2 \div 6}{4}$			
Зона В/Б-II Горизонт структурного элювия / Горизонт бесструктурного элювия Доломит (30 образцов)	$\frac{78 \div 91}{84}$	$\frac{4 \div 7}{8}$	$\frac{2 \div 6}{4}$	$\frac{2 \div 6}{4}$			
Зона А-I Горизонт бесструктурного элювия Карбонатно-глинистая мука (30 образцов)	$\frac{1 \div 4}{2}$	$\frac{35 \div 50}{43}$	$\frac{20 \div 30}{25}$	$\frac{10 \div 15}{13}$	$\frac{6 \div 12}{9}$	$\frac{2 \div 10}{5}$	$\frac{1 \div 5}{3}$
Зона А-II Горизонт бесструктурного элювия Карбонатно-глинистая мука (30 образцов)	$\frac{32 \div 64}{48}$	$\frac{5 \div 10}{7}$	$\frac{10 \div 25}{17}$	$\frac{10 \div 25}{17}$	$\frac{1 \div 10}{5}$	$\frac{1 \div 5}{3}$	$\frac{1 \div 5}{3}$

Примечание: В числителе указан диапазон изменения, в знаменателе – среднее значение.

В исходных карбонатных породах зоны В/Б преобладают кальций и кислород, входящие в состав кальцита (CaCO_3). В качестве примесей присутствуют магний (Mg) как компонент доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), кремний (Si), алюминий (Al) и калий (K) как составляющие 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, привнесенное инфильтрационными водами. В карбонатной муке (зона Б подзона II) содержание кальцита уменьшается за счет его растворения и выноса ионов Ca^{2+} , а количество других элементов, слагающих водоустойчивые минералы, увеличивается. Совместные доли кремния и алюминия в карбонатной муке этой зоны связаны с накоплением глинистых минералов.

Чтобы оценить влияние климатических факторов на процесс выветривания, проведены модельные эксперименты на образцах карбонатных пород кубической формы размерами 25×25 мм. Как и в случае с песчаниками, исследование представляло собой испытание на морозостойкость. Наиболее быстро этот процесс наблюдается в диапазоне естественных низких температур (промерзание при -18 ± 2 °C и оттаивание при $+20 \pm 5$ °C) у карбонатных пород, представленных доломитами. После каждых 10 циклов осуществлялся визуальный осмотр образцов с определением

их механических характеристик. В результате установлено, что через 20 циклов промерзания-оттаивания микрозернистый доломит начинает разваливаться на мелкие части с образованием на поверхности доломитовых зерен с выраженными габитусными элементами. При этом очевидна тенденция более интенсивного разрушения микрозернистого доломита с увеличением в его составе глинистой компоненты. В породах, представленных известняками, процесс физической дезинтеграции проходит медленнее: только после 30 циклов замораживания и оттаивания наблюдалось ухудшение физико-механических свойств на 10 %.

Таким образом, выветривание карбонатных пород сводится в основном к физической дезинтеграции. Существенным фактором выветривания являются сезонно-климатические перепады температур. 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. Создающиеся напряжения разрывают межзерновые структурные связи в породах, способствуя их механическому разрушению. Процессы химического выветривания отходят на второй план.

Четвертое защищаемое положение

Оценка существующей и ожидаемой суффозионной опасности на территории Восточного Закамья в карбонатных и терригенных элювиальных грунтах может быть выполнена на основании количественного прогнозирования, основанного на сочетании для каждого участка неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия.

Развитие любой территории невозможно без оценки потенциальной активизации опасных природных процессов. Несмотря на ряд исследований, нашедших отражение в работах А. В. Ступишина (1954), М. С. Кавеева (1954), Б. В. Васильева (1966), В. И. Мозжерина и А. Н. Шарифуллина (1988), А. В. Аникеева и С. А. Чумаченко (2011), в настоящий момент для Восточного Закамья отсутствует какое-либо системное районирование территории по степени карстово-суффозионной опасности.

Анализ способов картографирования геологических опасностей показывает, что наиболее востребованной в методическом плане сегодня является технология построения карт восприимчивости (предрасположенности) территории к развитию экзогенных геологических процессов.

Методология составления подобных карт заключается в следующей последовательности. Вначале выполняется подготовка тематических слоев, таких как: карта проявления экзогенных геологических процессов (ЭГП) (инвентаризационная карта), литологии, геоморфологии, гидрогеологии, цифровой модели рельефа, опираясь на которую можно установить абсолютные отметки на земной поверхности, угол склона, экспозиции и других факторов, обуславливающих возникновение ЭГП и интенсивность их развития. Поскольку в общей оценке значимость любого из факторов разная, необходимо валидировать вес отдельно взятого явления или процесса в зависимости от региональных геологических, морфометрических, климатических, техногенных условий. Такая оценка в последние годы выполняется с помощью различных детерминированных подходов и с использованием теории нечетких множеств. В данной работе для определения меры и степени воздействия каждого фактора использован метод соотношения частотностей (frequency ratio, FR).

А. Подготовка информационных слоев. При составлении карты восприимчивости первый шаг – установление факторов, обуславливающих развитие ЭГП. На основании полевых маршрутных наблюдений, анализа существующей информации о проявлениях карстово-суффозионных процессов выбраны следующие: 1) уклон поверхности, 2) тип грунтовых толщ, 3) глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта, 4) коэффициент неоднородности песков, 5) степень суффозионности карбонатной муки, 6) степень трещиноватости карбонатного массива. Каждый фактор включает определенное количество классов. Всего взято 6 факторов (слоев), внутри которых выделено в сумме 25 классов.

Следующий шаг – подготовка тематических карт, содержащих сведения о распространении, интенсивности, мощности или геометрических и других параметрах различных факторов, определяющих развитие суффозионных процессов.

Уклон поверхности. Такие факторы, как скорость поверхностного стока, градиент напора верховодки, напрямую связаны с градиентом уклона поверхности территории. Исходными данными при построении карты уклонов служит цифровая модель рельефа (ЦМР) для территории юго-восточной части Республики Татарстан.

Литологический состав поверхностных отложений. Учет фактора осуществлен на основании карты четвертичных отложений. Градация – исходя из принадлежности участка к аллювиальным, аллювиально-делювиальным, пролювиально-делювиальным, элювиально-делювиальным и элювиальным отложениям.

Гидрогеологические условия. В качестве численного фактора был принят градиент напора, вычисляемый как разница между значениями глубины залегания первого от поверхности водоносного горизонта и уровнем постоянного водоносного горизонта.

Неоднородность песчаников бесструктурной зоны. Фактор неоднородности гранулометрического состава песчаных грунтов является главенствующим при определении их суффозионной неустойчивости. В качестве основного критерия выступает коэффициент неоднородности, определенный в ходе лабораторных исследований песчаников на различных участках территории Восточного Закамья.

Неоднородность бесструктурного карбонатного элювия. В качестве критерия дифференцирования территории была выбрана степень неоднородности гранулометрического состава, определенная на основании расчетов суффозионности и экспериментальных исследований.

Степень трещиноватости карбонатных массивов структурного элювия. На этапе полевых исследований заложено и изучено 182 площадки трещиноватости. На основании полученных материалов все результаты объединены в группы по степени трещиноватости согласно ГОСТ 25100–2020. Это позволило в первом приближении выполнить районирование территории по степени трещиноватости пород. Причем экспериментальные исследования по определению критических параметров трещиноватости выполнены на установке собственной разработки (патент № 2022110200 от 15.04.2022 «Устройство для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования»). Итог работы – районирование территории Восточного Закамья по степени трещиноватости.

Тематические карты вышеперечисленных факторов представлены в диссертации.

Б. Определение веса факторов. Чтобы добиться объективности, выяснение веса каждого фактора и его классов реализовано с использованием метода соотношения частотностей (frequency ratio, FR), позволяющем оценить реальную площадную пораженность территории ЭГП с использованием ГИС-технологий.

Расчет веса каждого фактора методом соотношения частностей осуществлялся следующим образом. Сначала были вычислены площади классов каждого фактора и их процентные доли от площади изучаемой территории, а затем в пределах каждого класса – площадь проявления процесса (в км² и %) и соотношение площади проявления процесса к площади самого класса (вес FR). Полученные результаты приведены в табл. 12.

Табл. 12

Результаты определения веса факторов развития суффозионной опасности

Слой данных	Классы	% класса	% суффозионных участков	Вес по FR
Уклон поверхности, град	<10	39,8	44,1	1,11
	10-15	28,9	24,6	0,85
	15-20	21,4	20,2	0,94
	20-25	7,9	8,7	1,10
	>25	2,0	2,4	1,20
Стратиграфо-генетические комплексы	Элювиальные (e)	34,2	56,4	1,65
	Элювиально-делювиальные (ed)	8,9	9,4	1,06
	Пролювиально-делювиальные (pd)	16,5	11,9	0,72
	Аллювиально-делювиальные (ad)	18,3	10,0	0,55
	Аллювиальные (a)	22,1	12,3	0,56
Степень неоднородности грансостава песков	<3,5	46,7	13,0	0,28
	3,5÷5,5	26,5	32,5	1,23
	5,5÷7,0	26,8	54,5	2,03
Степень неоднородности грансостава карбонатной муки	<7,0	56,3	12,2	0,22
	7,0÷9,0	9,9	11,1	1,12
	9,0÷19,0	26,0	51,7	1,99
	>19,0	7,8	25,0	3,21
Степень трещиноватости массива	Очень слаботрещиноватые	42,1	9,2	0,22
	Слаботрещиноватые	33,0	16,4	0,50
	Среднетрещиноватые	16,8	34,1	2,03
	Сильнотрещиноватые	8,1	40,3	4,98
Гидравлический градиент	<3	9,9	5,5	0,56
	3÷5	13,5	11,0	0,81
	5÷10	46,8	46,5	0,99
	>10	29,8	37,0	1,24

Хорошо видно, что максимальные значения весов FR имеют диапазон степени неоднородности гранулометрического состава песков $C_u=5,5-7,0$ (FR=2,03), два диапазона степени неоднородности гранулометрического состава карбонатной муки $C_u=9,0-19,0$ (FR=1,99) и $C_u>19,0$ (FR=3,21), два диапазона степени трещиноватости массива: среднетрещиноватые (FR=2,03) и сильнотрещиноватые (FR=4,98). Именно эти факторы в указанных диапазонах можно считать определяющими опасность развития суффозионных процессов.

В. Построение и анализ карт восприимчивости. Растровые тематические карты со значениями, присвоенными для их классов, были умножены на соответствующие веса и просуммированы с целью получения простой карты, где каждая ячейка имеет определенное значение суммарного индекса восприимчивости к развитию ЭГП. Далее классифицирован растр с помощью модуля «Естественные границы».

В итоге построена единая интегральная карта с классификацией на 5 уровней восприимчивости к развитию карстово-суффозионных процессов (рис. 17): первый (практически неопасный) – территории с почти полным отсутствием риска развития карстово-суффозионных процессов, второй (малоопасный) – территории с низким уровнем интегрального риска, третий (умеренно опасный) – территории со средним уровнем риска, четвертый (опасный) – территории с высоким уровнем риска, пятый (весьма опасный) – территории с очень высоким уровнем интегрального риска.

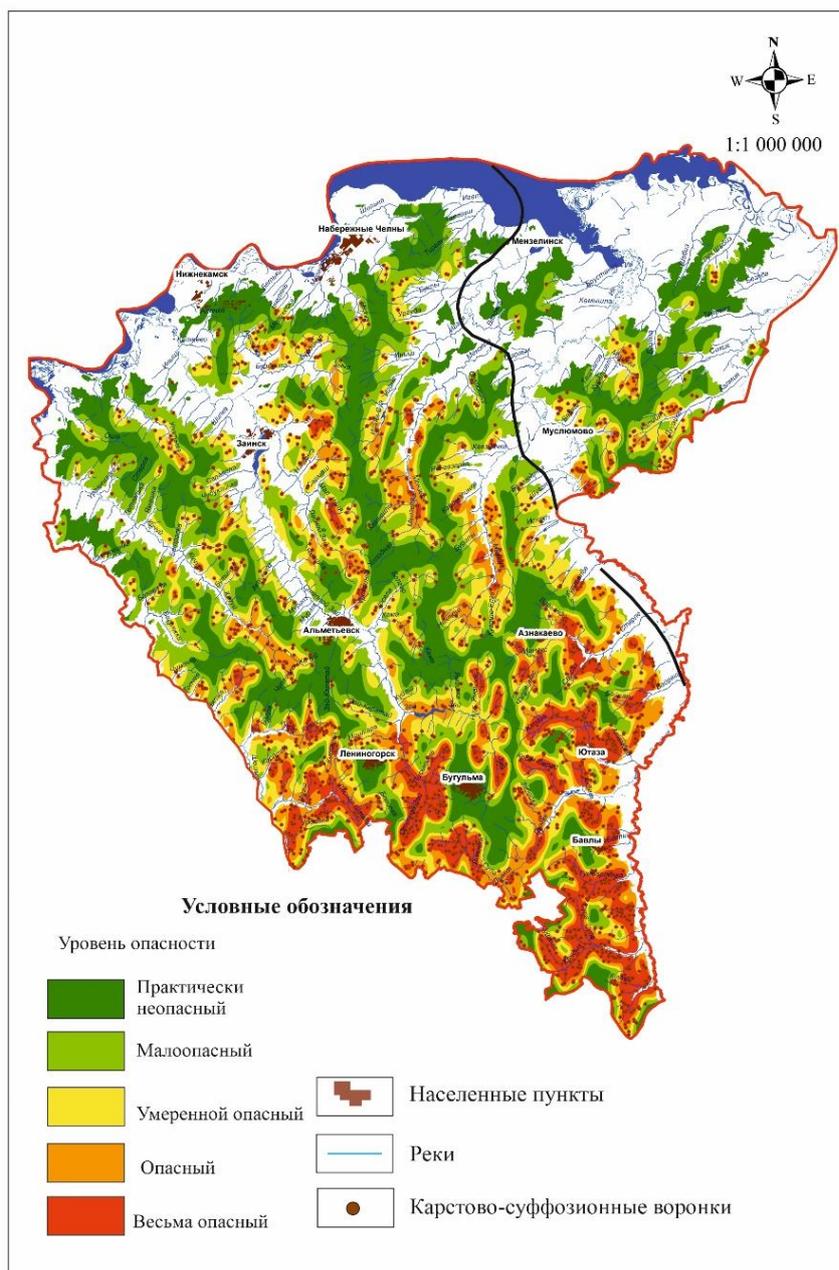


Рис. 17. Интегральная карта карстово-суффозионной опасности

Г. Валидация карт. Чтобы оценить надежность построенных карт восприимчивости к развитию карстово-суффозионных процессов, основанных на разных методах нахождения весов, решено использовать предложенный A. Linden (2006) анализ ROC-кривых, которые позволяют определить точность метода, показывая число «правильных» срабатываний. Количественную интерпретацию ROC дает показатель *AUC* (*area under ROC curve*) – площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций. Чем выше показатель *AUC*, тем качественнее классификатор, при этом значение 0,5 демонстрирует непригодность выбранного метода классификации (соответствует случайному гаданию). Для анализа ROC-кривых использовался статистический пакет SPSS Statistics. Значение *AUC*, полученные методом FR, составляет 0,844, что говорит о высоком качестве прогнозных карт. Прогностическая способность карт определенная по проверочному набору из 6 полигонов, равна 0,833.

Выполненное исследование показало, что около 10% территории Восточного Закамья

практически неопасно в плане возможности развития карстово-суффозионных процессов, 15 % территории отнесено к малоопасной области, 19 % территории подвержено среднему интегральному риску, 38 и 18 % территории – с опасным и весьма опасным уровнем риска развития карстово-суффозионных процессов соответственно.

Наибольшая опасность развития карстово-суффозионных процессов характерна для территорий верхнего и среднего плато, а также их приводораздельных частей. На верхнем плато к наиболее существенным факторам, предопределяющим опасность, относятся наличие элювия по карбонатным породам, трещиноватость подстилающих карбонатных массивов и неоднородность бесструктурного карбонатного элювия. На среднем плато опасные и весьма опасные участки выделены преимущественно у истоков крупных и средних рек. Здесь преобладающими факторами являются высокая трещиноватость массивов, нарушенных вследствие тектонических причин, а также гидрогеологический фактор, связанный с большой водосборной площадью бассейнов рек в этих частях рельефа. На склоновых частях приводораздельных участков решающие факторы развития суффозионных процессов – это высокие уклоны рельефа и высокие уровни и градиенты грунтовых вод. Дополнительным усугубляющим фактором является литологический состав пород, представленных в основном элювиально-делювиальными слабоуплотненными грунтами с высокими фильтрационными характеристиками.

Произведенное районирование хорошо согласуется с данными, полученными при маршрутном обследовании территории. Большая часть воронок обнаружена на опасных и весьма опасных участках (4 и 5 категории опасности). Здесь отмечено 3048 воронок, что составляет 81 % от общего числа. Остальные карстово-суффозионные формы зафиксированы на умеренно опасных территориях (581 шт., или 16 %). На территориях, отнесенных к малоопасным и практически неопасным, – только 109 воронок, или 3 % от общего числа.

Количественная информация о выявленных карстово-суффозионных воронках в различных инженерно-геологических районах представлена в табл. 13.

Табл. 13

Количественное распространение карстово-суффозионных воронок территории Восточного Закамья

Области	Районы и подрайоны		Площадь, км ²	Количество воронок, шт.
Камско-Бельская низменность	Эрозионно-денудационные приводораздельные	Среднее/нижнее плато	1032	92
		Нижнее плато/склоны	651	42
	Эрозионно-денудационные водораздельные	Среднее плато	2298	200
		Нижнее плато	997	190
Бугульминско-Белебеевская возвышенность	Эрозионно-денудационные приводораздельные	Верхнее/среднее плато	1251	136
		Среднее/нижнее плато	1911	213
		Нижнее плато/склоны	1178	110
	Эрозионно-денудационные водораздельные	Верхнее плато	3792	150
		Среднее плато	8110	1048
		Нижнее плато	5698	707
			Всего:	2888

Осуществленное районирование по уровню восприимчивости территорий к развитию суффозионных процессов позволило дополнить инженерно-геологическое районирование еще одним таксоном – участком. Каждому уровню опасности на карте присвоен соответствующий индекс, например I-Б-3¹, II-В-2³ и т. п. (рис. 18).

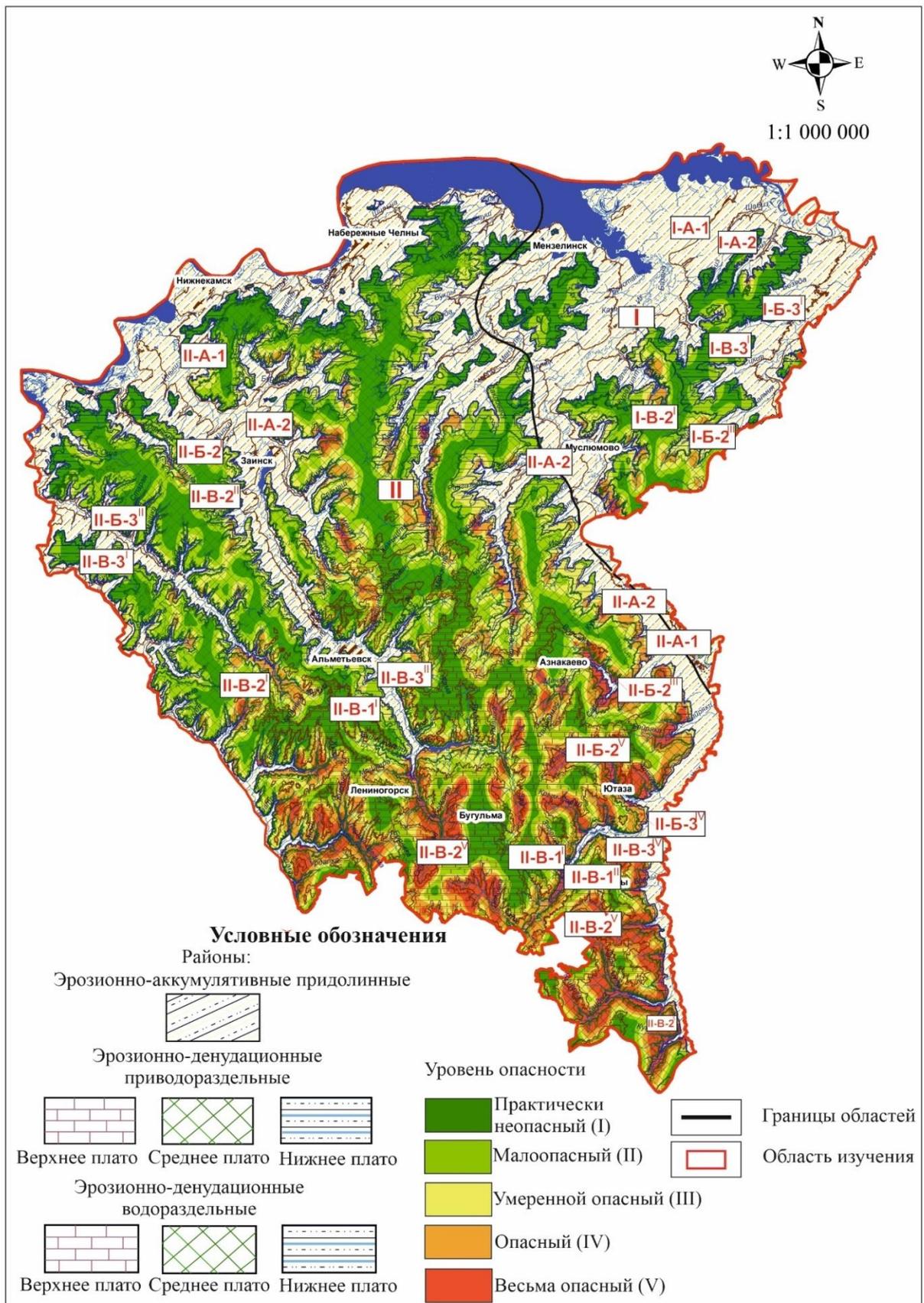


Рис. 18. Карта инженерно-геологического районирования с выделенными участками уровней опасности развития суффозионных процессов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлены основные закономерности протекания гипергенных процессов преобразования осадочных пород на территории Восточного Закамья. Формирование различных видов элювиальных грунтов в первую очередь обусловлено пространственным распространением преобладающих литотипов осадочных пород. Установлено, что в центральной части территории на площадке верхнего плато распространен элювий по карбонатным породам преимущественно уржумского яруса, среднего плато – карбонатно-терригенный тип элювия преимущественно казанского и уржумского (на высоких частях) ярусов, нижнего плато – терригенный элювий казанского яруса.

Во вторую очередь это обусловлено принадлежностью участков к эрозионно-денудационным водораздельным и приводораздельным структурам. В процессе исследования выполнено инженерно-геологическое районирование территории, основанное на выделении двух областей: Камско-Бельской низменности и Бугульмино-Белебеевской возвышенности, трех районов: эрозионно-аккумулятивных придолинных, эрозионно-денудационных приводораздельных и эрозионно-денудационных водораздельных, в дальнейшем разделенных на подрайоны верхнего, среднего и нижнего плато, денудационных склонов, поверхностей и примыкающих к ним склонов речных террас. Установлено, что наибольшие мощности терригенные элювиальные грунты имеют на водораздельных участках нижнего плато, а карбонатные элювиальные грунты – на водораздельных участках верхнего плато.

Основным движущим процессом гипергенного преобразования песчаников является выщелачивание кальцитового цемента, в результате чего первичные цементационные типы структур сменяются более слабыми – коагуляционными и механическими. Показано, что инженерно-геологическая характеристика массивов элювиальных песчаных грунтов может быть выполнена только с выделением зон их гипергенных преобразований с контрастными отличиями классификационной принадлежности, свойств, минерального и химического состава. Предложены четыре зоны: элювиальных песков, элювированных песчаников, химической дезинтеграции, сохранного массива.

Наиболее непростой и неблагоприятной в инженерно-геологическом плане является зона элювированных песчаников, мощность которой может достигать 20 м. Учитывая высокую неоднородность прочностных и деформационных свойств грунтов этой зоны, часто несистемную и потому труднопрогнозируемую, проблематичность отбора образцов ненарушенного сложения, предложена идентификация элювированных песчаников с помощью диаграммы рассеяния. Построены региональные таблицы определения механических характеристик в зависимости от параметров зондирования.

На территории Восточного Закамья элювий по глинистым породам развивается преимущественно на поверхности нижнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности и Камско-Бельской низменности. Гипергенные преобразования глинистых пород уржумского яруса обусловлены как физическим выветриванием под действием отрицательных температур в период валдайского оледенения, так и химическими процессами выщелачивания инфильтрационными водами доломита, кальцита и гипсов из дезинтегрированных глин и последующей реакцией гидролиза полевых шпатов.

В профиле выветривания глинистых массивов предложено выделение трех зон: элювиальных глин, элювированных глин и сохранного массива. Определены диагностические критерии выделения зон в соответствии с их минеральным составом и пористостью. Построены региональные таблицы механических характеристик для элювированных глин и глин сохранного массива. Рассчитаны

наиболее характерные диапазоны удельного сопротивления грунта внедрению конуса и фрикционного соотношения при статическом зондировании всех зон для их идентификации с помощью диаграммы рассеяния.

Элювиальные карбонатные грунты распространены преимущественно в пределах верхнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности. В профиле выветривания карбонатных пород выделены горизонты структурного и бесструктурного элювия, различающихся различной степенью преобразованности материнских пород, механическим и минеральным составом, а также структурно-текстурными признаками. Помимо зоны сохранного массива предложены зоны сильного, средней степени и слабого изменения.

Несмотря на естественный разброс признаков и свойств конкретных зон выветривания, их особенности четко проявляются при рассмотрении минерального состава и истории возникновения породообразующих минералов в элювии. Из материалов исследования вытекает: а) для песчаников изменения минерального состава связаны с удалением кальцита из порового пространства и цементацией минеральных частиц гидроксидами железа; б) в глинах процесс дезинтеграции сопровождается выщелачиванием кальцита, доломита и гипса с последующей реакцией гидролиза полевых шпатов и, как следствие, уменьшением доли микроклина и появлением каолинита; в) изменение минерального состава в карбонатных грунтах наблюдается в виде растворения кальцита и доломита и постепенного накопления глинистых минералов.

Масштабные преобразования пород модифицируют все компоненты инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в т.ч. способствуют активизации суффозионных процессов, непосредственным образом связанных с наличием элювиальных грунтов.

Применительно к территории Восточного Закамья выполнена оценка существующей и ожидаемой суффозионной опасности в карбонатных и терригенных элювиальных грунтах посредством количественного прогнозирования, основанного на сочетании для каждого участка неоднородности гранулометрического состава верхнего горизонта бесструктурного элювия и степени трещиноватости подстилающих пород зоны структурного элювия. В результате построена карта инженерно-геологического районирования территории Восточного Закамья с выделенными участками уровней опасности развития суффозионных процессов, которая может быть использована для планирования инженерных изысканий и при градостроительном проектировании.

Выполненные в диссертационном исследовании результаты внедрены в практику деятельности Управления по реализации проектов строительства Публичного акционерного общества «Татнефть» им. В.Д. Шашина.

Закономерности, выявленные для территории Восточного Закамья, могут быть экстраполированы на аналогичные районы. В частности, выявленные специфические особенности терригенных и карбонатных элювиальных толщ, диагностические критерии выделения зон выветривания, их идентификация по данным статического зондирования, региональные значения прочностных и деформационных свойств могут использоваться в качестве справочного и методического материала при проведении инженерно-геологических исследований.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Жаркова, Н. И. Исследование агрессивности грунтов по отношению к строительным конструкциям реконструируемых объектов нефтегазовой отрасли восточной части Республики Татарстан / Н. И. Жаркова, **А. И. Латыпов**, Г. А. Черныйчук // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 114–116.
2. **Латыпов, А. И.** Зональность профиля выветривания среднепермских глин на территории Восточного Закамья / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев, Ю. Н. Колчина // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 125–135.
3. **Латыпов, А. И.** Зональность профиля выветривания среднепермских песчаников на территории Восточного Закамья / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев // Регулярный научный журнал Охотинского общества грунтоведов «Грунтоведение». – 2024. – № 1 (22). – С. 33–43.
4. **Латыпов, А. И.** Интегральная оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева, Э. А. Королев // Геоэкология. – 2022. – № 6. – С. 37–45.
5. **Латыпов, А. И.** Об интерпретации данных статического зондирования / А. И. Латыпов, Е. Н. Яббарова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 10. – С. 82–90.
6. **Латыпов, А. И.** Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева // Регулярный научный журнал Охотинского общества грунтоведов «Грунтоведение». – 2022. – № 1 (18). – С. 31–43.
7. **Латыпов, А. И.** Особенности строения и формирования элювиальных отложений в карбонатно-терригенных грунтовых массивах Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2023. – Т. 9 (75), № 4. – С. 62–75.
8. Муравьев, Ф. А. Карбонатный элювий на территории г. Казани / Ф. А. Муравьев, Н. И. Жаркова, **А. И. Латыпов** // Инженерная геология. – 2013. – № 4. – С. 34–43.
9. Яббарова, Е. Н. Опыт исследования грунтов с использованием метода статического зондирования на объектах г. Казани / Е. Н. Яббарова, **А. И. Латыпов**, А. А. Дивеев // Инженерные изыскания. – 2021. – Т. 15, № 3–4. – С. 8–19.
10. Яббарова, Е. Н. Уточнение корреляционных зависимостей между данными статического зондирования и деформационно-прочностными характеристиками грунтов / Е. Н. Яббарова, **А. И. Латыпов** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 82–89.

Объекты интеллектуальной собственности

11. Пат. 2787325 Российская Федерация, МПК G01N 15/00. Устройство для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов**, О. А. Софинская. – № 2022110200; заявл. 15.04.2022; опубл. 09.01.2023. Бюл. № 1.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных
и системы цитирования*

12. **Latypov, A.** Using Plaxis software for the forecasting of karst-suffusion failures in carbonate eluvium / A. Latypov, N. Zharkova, A. Ter-Martirosyan // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. – Albena, 2017. – Vol. 17. – P. 969–976.
13. **Latypov, A. I.** Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction's point of view (by the example of Kazan, Russia) / A. I. Latypov, N. I. Zharkova, F. A. Mouraviev // Global View of Engineering Geology and the Environmental. Proceeding of the international symposium and 9th Asian regional conference of IAEG. – Beijing, 2013. – P. 891–896.
14. **Latypov, A.** Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities / A. Latypov, N. Zharkova, A. Ter-Martirosyan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 365. – P. 042058. – doi:10.1088/1757-899X/365/4/042058.
15. **Latypov, A.** Patterns of distribution of eluvia soils in the oil region of Tatarstan / A. Latypov, A. Garaeva // VII International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VII-2024). – 2024. – Vol. 524.
16. **Latypov, A.** Regional patterns of zoning hypergenic transformations of sedimentary rocks of the middle Permian age of the Eastern Zakamye / A. Latypov, E. Korolev, A. Garaeva // II International Scientific and Practical Conference “Energy, Ecology and Technology in Agriculture” (EEA2023). – 2024. – Vol. 480.
17. Yabbarova, E. N. Determination of the Bearing Capacity of Piles Using the Cone Penetration Test / E. N. Yabbarova, **A. I. Latypov**, E. A. Korolev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 753. – P. 1–7.
18. Yabbarova, E. N. Application of Machine Learning for Prediction of Cone Penetration Test Data / E. N. Yabbarova, A. A. Zaikin, **A. I. Latypov** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666. – P. 1–7.

Публикации в сборниках статей и материалах конференций

19. Гараева, А. Н. Инженерно-геологическая характеристика молодых кор выветривания эрозионно-денудационных останцев Бугульминского плато юго-востока Татарстана / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов** // Проблемы геологии и освоения недр: XXVI Междунар. науч. симп. им. акад. М. А. Усова студ. и мол. учен. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2022. – Т. 1. – С. 239–241.
20. Гараева, А. Н. Особенности карстования карбонатных массивов Бугульминского плато Республики Татарстан / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов**, Э. А. Королев // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: XIV Межрег. науч.-практ. конф. (Уфа, 23–26 мая 2022 г.). – М.: Перо, 2022. – С. 28–33.
21. Гараева, А. Н. Элювиальные отложения эрозионно-денудационных останцев Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов**, Д. Р. Зарипова // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: сб. ст. Всерос. молодеж. конф. – М.: Перо, 2021. – С. 16–20.
22. Гараева, А. Н. Особенности гипергенного преобразования карбонатно-терригенных пород Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов**, Д. Р. Зарипова //

- Геологические науки – 2021: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Саратов, 2–3 декабря 2021 г.). – Саратов: Техно-Декор, 2021. – С. 49–53.
23. Гараева, А. Н. Особенности континентального литогенеза карбонатных пород бугульминского плато юго-востока Татарстана / А. Н. Гараева, **А. И. Латыпов**, Э. А. Королев // Пустоваловские чтения 2022: материалы традиц. конф., посвящ. 120-летию Леонида Васильевича Пустовалова (Москва, 20–23 декабря 2022 г.). – М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина, 2022. – С. 36–38.
24. **Латыпов, А. И.** Карбонатные элювиальные грунты Бугульминско-Белебеевской возвышенности / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев // Сергеевские чтения: Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Вып. 23: материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). – М.: ГеоИнфо, 2022. – С. 78–84.
25. **Латыпов, А. И.** Оценка несущей способности свай, погруженных в элювиальные песчаники уржумского яруса Нижнекамского промышленного узла Республики Татарстан (Россия) / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев // Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы междунар. конф. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2023. – № 1. – С. 102–109.
26. **Латыпов, А. И.** Региональные закономерности районирования гипергенных преобразований осадочных пород среднепермского возраста Восточного Закамья / А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, Э. А. Королев // Сергеевские чтения: Региональная инженерная геология и геоэкология. Вып. 25: материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28–29 марта 2024 г.). – М.: ГеоИнфо, 2024. – С. 71–74.
27. Яббарова, Е. Н. Изучение грунтовых условий г. Казани методом статического зондирования / Е. Н. Яббарова, **А. И. Латыпов** // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: Труды Междунар. науч. конф. (Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.). – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. – С. 287–290.
28. Яббарова, Е. Н. Построение корреляционных зависимостей между данными статического зондирования грунтов и показателями их состояния на примере Вахитовского района города Казани / Е. Н. Яббарова, **А. И. Латыпов** // Уральская горная школа – регионам: Междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 8–9 апреля 2019 г.). – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – С. 88–89.