

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42>
УДК 51.435.2

**ХАРАКТЕРИСТИКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ
БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ
ВОЗВЫШЕННОСТИ**
**CHARACTERISTICS OF THE SUFFOSION HAZARD OF THE TERRITORY
OF THE BUGULMA PLATEAU OF THE BUGULMA-BELEBEY UPLAND**

А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева
A. I. Latypov, A. N. Garaeva, O. V. Luneva

Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5
Kazan Federal University, 420008, Russia, Kazan, Kremliovskayast, 4/5

airatlat@mail.ru, anastya-solnce@mail.ru, olunjova@yandex.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению территории, расположенной в юго-восточной части Республики Татарстан (РТ). Несмотря на высокую антропогенную освоенность территории (в данной части РТ расположено несколько крупных городов, разрабатываются несколько крупных нефтяных месторождений, функционируют ряд крупных промышленных заводов), инженерно-геологическая изученность значительно уступает западной и центральной частям РТ. В значительной степени такая картина обусловлена широким распространением в этой части элювиальных грунтов, повсеместно выходящих на дневную поверхность и часто являющихся основанием фундаментов зданий и сооружений. Помимо высокой степени неоднородности физико-механических свойств как по площади, так и по глубине, данные грунты обладают высокой степенью суффозионной неустойчивости. Это создает серьезные проблемы при проектировании оснований зданий и сооружений, сложенных элювиальными грунтами. Дополнительную трудность вызывает то, что техногенное освоение территорий способствует значительной активизации процессов суффозии и может привести к серьезным деформациям оснований фундаментов. Целью выполненных исследований являлось проведение комплексной инженерно-геологической оценки элювиальных грунтов с выделением типов молодых кор выветривания, а также оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато с учетом параметров трещиноватости и суффозионной устойчивости грунтов. Авторы работы представляют результаты типизации, лабораторных исследований основных физико-механических свойств, минерального состава и пространственной закономерности распространения суффозионно-опасных грунтов на территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Выделены литологические разновидности элювиальных грунтов, детально описаны все формы коры выветривания на исследуемой территории. На основании пространственного анализа данных в программной среде ArcMap 10.8 была построена карта геолого-геоморфологических процессов территории Бугульминского плато, классифицированы карстово-суффозионные процессы по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим условиям в соответствии с типами геологической среды. Выполнена оценка суффозионной опасности грунтов исследуемой территории, рассчитаны параметры трещиноватости и суффозионной устойчивости. Установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми. Расчеты суффозионной пораженности показали, что исследуемая площадь по интенсивности провалообразования относится преимущественно к малоопасным, а в речных долинах и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай — к умеренно опасным. Полученные результаты будут полезны как для принятия предварительных проектных решений на незастроенных территориях, так и для прогноза развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов на участках существующих зданий и сооружений.

Abstract: This work is devoted to the studies of the territory, located in the south-eastern part of the Republic of Tatarstan. Despite the high anthropogenic development of the territory (several large cities are located in this part of the Republic of Tatarstan, several oil fields are being developed, a number of large industrial plants operate), the engineering and geological study is significantly inferior to the western and central parts of the Republic

of Tatarstan. This is due to the wide spread of eluvial soils in this part of the territory, which everywhere come out on the daytime surface and are the basis of the foundations of buildings and structures. Except the high degree of diversity of physical and mechanical properties, as in area so in depth rates, these soils have a high degree of suffusion instability. This creates serious problems while design of the bases of buildings and structures composed of eluvial soils. Another problem is created by the fact that anthropogenic development of territories contributes to a significant activation of suffusion processes, and can lead to serious deformations of the foundations of buildings and structures. The purpose of the performed studies was to conduct a comprehensive engineering and geological assessment of eluvial soils with the identification of types of new weathering crusts, as well as an assessment of the suffusion danger of the Bugulma plateau territory, taking into account the parameters of fracturing and suffusion stability of soils. The authors present the results of the typification of laboratory studies, the main physical and mechanical properties, mineral composition and spatial patterns of the distribution of suffusion dangerous soils on the territory of the Bugulma plateau of the Bugulma-Belebey upland. Lithological varieties of eluvial soils are identified all forms of weathering crust in the studied area are described in detail. Based on spatial analysis in the ArcMap 10.8 software environment, a map of geological and geomorphological processes of the Bugulma plateau territory was constructed, karst-suffusion processes were classified according to geological, geomorphological, hydrogeological conditions in accordance with the types of geological environment. The assessment of the suffusion danger of soils of the studied territory was carried out, the parameters of fracturing and suffusion stability were calculated. It is established that all the differences of structureless eluvium developed in the upper part of the geological cross section within the studied territory are potentially suffusion-unstable. The calculations of suffusion damage have shown that studied area in terms of the intensity of Failure formation belongs mainly to moderately dangerous, and in river valleys and terraces deposit of large rivers like Ik, Sheshma, StepnoyZay — to moderately dangerous. The results will be useful both for making preliminary design decisions on undeveloped territories and for predicting the development of unfavorable engineering and geological processes on the areas of existing buildings and structures.

Ключевые слова: суффозионная неустойчивость, элювий, карбонатный грунт, кора выветривания, трещиноватость грунтов, оценка суффозионной опасности, Бугульминское плато.

Keywords: suffusion instability, eluvium, carbonate soil, weathering crust, fracturing of soils, assessment of the suffusion danger, Bugulma plateau.

Введение

Бугульминское плато находится в северо-западной части Бугульминско-Белебеевской возвышенности и приурочено к южному куполу Татарского свода кристаллического фундамента. В геологическом строении в верхней части разреза территории участвуют отложения казанского и уржумского яруса Биармийского отдела пермской системы, представленные терригенно-карбонатными, в речных долинах — терригенными породами неогеновой системы. На Бугульминском плато расположены такие крупные города, как Альметьевск, Лениногорск, Бугульма и Бавлы.

Территория Бугульминского плато представляет собой плосковершинную денудационную возвышенность. В современном рельефе она выражена разновысотными ступенями, разделенными уступом. Эрозионно-денудационные останцы покрыты отложениями четвертичного возраста представленными элювиальными, элювиально-делювиальными, делювиально-пролювиальными, аллювиально-делювиальными и аллювиальными разностями мощностью до нескольких метров. Плато изрезано долинами рек Шешма, Степной Зай и Ик с много-

численными боковыми притоками. Между эрозионными речными долинами сформированы гряды-увалы, являющиеся водосборными бассейнами. Их склоны осложнены обрывами, уступами и террасами, часто проявляются вертикальные борозды и рытвины — следы временных русловых потоков. Все речные долины характеризуются асимметричным строением, выраженным в неравномерных уклонах и неоднородном террасировании их бортов. Перепад гипсометрических отметок в пределах Бугульминского плато составляет от 280–360 м на вершинах водоразделов до 120–180 м — в пределах речных долин.

Элювиальные грунты на исследуемой территории имеют широкое распространение и встречаются практически повсеместно. При этом, вследствие трудно предсказуемого характера выветривания при их образовании и, следовательно, высокой переменчивости свойств, проектирование сооружений на таких грунтах всегда сопряжено с серьезными проблемами. Основная опасность заключается в возможном проявлении суффозионных процессов, напрямую связанных с наличием элювиальных отложений. Дополнительной

трудностью является сложность отбора образцов в таких грунтах для непосредственных испытаний, что приводит к неоднозначной интерпретации как геологического строения на конкретных участках строительства, так и получаемых в полевых и лабораторных условиях характеристик грунтов.

Несмотря на широкое распространение, изученность карстово-суффозионных процессов на территории Бугульминского плато довольно низкая. К наиболее значительным работам следует отнести исследования А. В. Аникеева, С. А. Чумаченко, а также В. А. Елкина [2,4], которые, несмотря на их глубину, имеют значительный перекося в сторону карстовой опасности, мало уделяя внимание суффозионным процессам. Вместе с тем исследования показывают, что именно суффозионные формы имеют преобладающее распространение практически на всей рассматриваемой территории.

Изучению элювиальных грунтов с точки зрения развития суффозии посвящено немало работ по всему миру. Анализ имеющейся литературы показал, что существующие исследования имеют два вектора направленности. Некоторые исследователи связывают практическую оценку суффозионной опасности с поиском закономерностей параметров выветривания от различных факторов [12], другие — изучают влияние процессов выветривания на развитие неблагоприятных факторов для проектирования и строительства, не оценивая количественно изменения физико-механических свойств самих элювиальных грунтов [17].

Существенным недостатком большинства работ является то, что элювиальные грунты и связанные с ними процессы изучаются на весьма незначительных площадях. Это не дает возможность интерполировать полученные результаты на более обширные территории, что, в свою очередь, не позволяет построить общую картину распространения элювия для регионов, найти закономерности изменения физико-механических характеристик, параметров выветривания, которые имеют важное значение для понимания развития суффозионных процессов. В этом плане выделяются некоторые работы [14,15,18], но приведенная в них информация отрывиста и слабо систематизирована.

Традиционно в литературе описанию элювиальных грунтов посвящены отдельные параграфы и главы учебников [1,3], часто составляющих основу нормативных документов в области оценки карстово-суффозионной и суффозионной опасности, либо материалы различных конференций, посвященных решению той или иной конкретной задачи [5,13,16].

К наиболее свежим в области суффозионной опасности следует отнести работы [9; 10], в которых пред-

принята попытка выполнить интегральную оценку риска с помощью построения тематических карт. В качестве наиболее значимых выбрано 5 факторов, обуславливающих развитие суффозии: уклон поверхности, абсолютные отметки поверхности, геологическое строение территории, типы фильтрационных разрезов, расстояние до реки. Далее, на основании методики Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ) (Санкт-Петербург, Россия), была выполнена оценка суффозионной опасности 26 разновидностей песчаных и крупнообломочных грунтов.

Таким образом, на сегодняшний день не имеется исследований, направленных на изучение суффозионной опасности территории Бугульминского плато, а существующие методики исследования не отличаются комплексностью и универсальностью.

Методика исследований

Основной целью выполненных исследований являлось проведение литологической и инженерно-геологической оценки элювиальных грунтов с выделением типов молодых кор выветривания, а также оценка карстово-суффозионной опасности территории Бугульминского плато с учетом параметров трещиноватости и суффозионной устойчивости грунтов.

На первом этапе исследований для оценки карстово-суффозионной опасности был выполнен анализ имеющихся картографических материалов территории. К ним относились космоснимки различных лет, аэрофотоснимки, топографические планы. Учитывая размеры исследуемой области, первичный поиск суффозионных форм рельефа производился с использованием программного комплекса SASPlanet, позволяющего достаточно уверенно устанавливать суффозионные деформации диаметром 3 м и более.

На втором этапе исследований проводилось полевое маршрутное обследование изучаемой территории с целью уточнения и сбора новых данных пораженности территории карстово-суффозионными процессами, а также получения информации о геологическом строении территории с помощью описания и фотодокументации стенок карбонатных карьеров, вскрывающих разрезы зоны гипергенеза. При описании вскрытых разрезов выделялись слои пород различной степени преобразования, отмечались особенности их сложения и минерального состава. Попутно проводился отбор образцов пород для определения их физико-механических свойств. В общей сложности исследовали 175 карьеров, расположенных в пределах Бугульминского плато.

Полученные материалы были в дальнейшем обработаны в программной среде ArcMap 10.8. В качестве исходных материалов использовались топографическая основа электронной карты масштаба 1:200000 в проекции Гаусса-Крюгера (координатная система Пулково, 1942 г.), созданная на кафедре геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, и цифровая модель рельефа с сайта EarthExplorer. Дальнейший пространственный анализ выделения типов местности проводился инструментами SpatialAnalyst, в результате чего были построены карты уклона поверхности, карта геолого-геоморфологических процессов территории Бугульминского плато. Используя известные методики [11], авторами были классифицированы карстово-суффозионные процессы по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим условиям и соотнесены по их интенсивности к типам геологической среды.

В настоящее время в инженерной геологии отсутствует единый методологический подход к количественной оценке суффозионной опасности территорий, что связано как с различиями в объяснениях разных исследователей механизма протекания суффозионного процесса, так и в оценке потенциальных последствий для объектов строительства. За основу нами была принята методика Рагозина А. Л. [8], которая послужила базой существующих нормативных документов в Российской Федерации в сфере оценки пораженности территорий карстово-суффозионными процессами.

Согласно этой методике, плотность воронок определяется по формуле

$$K_N = \frac{N}{S}, \quad (1)$$

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

Пораженность территории провалами

$$K_S = \frac{\Sigma s}{S}, \quad (2)$$

где Σs — суммарная площадь воронок.

Для оценки суффозионности элювиальных грунтов в настоящее время активно используются методики ВНИИГ [6,7]. Их преимущества заключаются в том, что они позволяют рассматривать массив суффозионного грунта и как дисперсную среду, и как трещиноватый скальный массив. В первом случае, суффозионность рассчитывается на основании анализа гранулометрического состава грунта, во втором — на основании параметров трещиноватости.

На территории Бугульминского плато представлены все зоны экзогенного изменения карбонатных пород — от ненарушенного скального массива до карбонатной муки. По этой причине такой двухсторонний подход нами представляется весьма перспективным.

Используя методику ВНИИГ, прежде всего необходимо определить, к какой категории относится заданный состав по характеру суффозионности. Для решения этого вопроса рекомендуются два способа: первый способ характеризует несущую способность грунта, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц d_{min} [7]. Второй способ характеризует грунт как практически несущий, из которого допускается незначительный вынос мельчайших его частиц, но без нарушения прочности и устойчивости грунта [7].

Согласно первому способу расчета, частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте, называются суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта при скорости фильтрации выше критической [7]. Если окажется, что

$$d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} > d_{min}, \quad (3)$$

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

$$d_{ci}^{max} = 0,77d_0^{max} < d_{min}, \quad (4)$$

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

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

$$d_0^{max} = xC \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (5)$$

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

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

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

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

$$x = 1 + 0,05C_u, \quad (7)$$

б) для гранулометрического состава грунтов с $C_u > 25$

$$x = 0,35(2 + \sqrt{C_u}), \quad (8)$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (9)$$

Для ориентировочной оценки суффозионной опасности грунта используют коэффициент неоднородности грансостава. Если $C_u > 20$, то грунт следует считать суффозионным, при $C_u = 10-20$ — переходным, если $C_u < 10$, грунт относится к несущим.

Второй способ методики ВНИИГ основывается на анализе результатов наблюдений, которые показывают, что в случае выноса из грунта не более 3–5% по массе самых мелких частиц, его прочность и устойчивость изменится незначительно. Следовательно, к практически несущим будет относиться такой грунт, из которого могут быть вынесены фильтрационным потоком мельчайшие частицы в количестве, не превышающем 5% по массе. Таким образом, грунт следует считать несущим, если параметры его гранулометрического состава удовлетворяют условию

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \quad (10)$$

$$N = 0,10 \sqrt[6]{C_u} (2 + \sqrt{C_u}) \frac{n}{1-n}, \quad (11)$$

В случае, если зависимость не удовлетворяется, грунт считается суффозионным.

Экспериментальная часть

Анализ распространенности элювиальных толщ показал, что в пределах всей территории Бугульминского плато широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Они покрывают практически все выположенные вершины эрозионно-денудационных останцев. На склонах останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала. В долинах малых рек элювий захоронен под относительно мощной толщей делювиальных и аллювиальных отложений. Таким образом, определенную проблему составляют элювиальные грунты выположенных вершин эрозионно-денудационных останцев, слагающих верхнюю часть карбонатных массивов, поскольку именно они в большинстве случаев находятся во взаимодействии с инженерными сооружениями.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза. В исходном, неизменном, состоянии известняки и доломиты, слагающие эрозионно-денудационные останцы, представляют собой плотные породы светло-серой окраски с микро-тонкозернистой структурой, массивной или неяснослоистой текстурой из-за наличия глинистых слоев. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности. Протяженные трещинные фильтрационные каналы раскрытостью до 5,0 см обусловили хорошую дренированность верхней части эрозионно-денудационных останцев, исключая образованные здесь застойные водоемы или заболоченные понижения. Таким образом, породы зоны гипергенеза большую часть времени находились в условиях низкой увлажненности, что существенно замедлило интенсивность их выветривания.

В геологических разрезах, где процессы выветривания зашли более глубоко, по поверхностям карбонатных массивов эрозионно-денудационных останцев развиваются молодые коры выветривания площадного типа мощностью до 4,0–6,0 м. В основании кор выветривания лежат плотные, слабо трещиноватые известняки, сложенные микрозернистым кальцитом. Однородный минеральный состав и структура предопределили высокую устойчивость пород к процессам выветривания. За счет этого они в большей части разрезов стенок карьеров являются ложем для покровных элювиальных отложений. На плотных известняках согласно залегают более разуплотненные карбонатные породы, разбитые системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноплитчатые отдельности. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется иллювиальный тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей, структура изменяется от параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность этого слоя составляет от 1,5 до 2,0 м. Особенностью слоя разуплотненных карбонатных пород является хорошая структурированность отдельностей. Все блоки и плитки, разделенные трещинами, сохраняют особенности залегания и структурно-текстурные характеристики исходных известняков и доломитов. Таким образом, на начальной стадии гипергенного преобразования карбонатные породы подвер-

гаются дезинтеграции, что приводит к увеличению их водо- и газопроницаемости.

Над слоем структурного элювия залегают более рыхлые известняки и доломиты, представляющие собой горизонт бесструктурного элювия. Слой бесструктурного элювия сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. Если в пределах слоя структурного элювия блочные и плитчатые отдельности расположены упорядоченно, то здесь все тонкие плиточки разрушенных известняков и доломитов разориентированы по отношению друг к другу. В отдельных участках горизонта плиточки налегают друг на друга, в других — наклонены под углом 5–20°, в третьих — волнообразно изгибаются, образуя небольшие по амплитуде экзогенные складочки. Плиточки карбонатных пород разделены относительно широкими вертикальными и горизонтальными трещинами, заполненными тонкодисперсным карбонатным материалом с включениями дресвы. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м.

Венчает профиль молодой коры выветривания горизонт, сложенный карбонатной мукой с включениями угловатых обломков известняков и доломитов размером до 2,0 см. Карбонатная мука характеризуется 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. В кровле горизонта карбонатная мука обогащается глинистым материалом, придающим элювиальным грунтам светло-бежевую окраску. Глинистый материал поступает из вышерасположенного почвенно-растительного слоя в период таяния снега и ливневых осадков. В отдельных разрезах стенок карьеров верхняя зона бесструктурного элювия имеет более сложное строение. В его пределах наблюдается чередование слоев различной степени преобразования. Слои карбонатной муки могут перемежаться со слоями тонкоплитчатых карбонатных пород сцементированных тонкодисперсным карбонатно-глинистым иллювием. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

Как видно из строения бесструктурного элювия выветривание карбонатных пород сводится к физической дезинтеграции. Основным 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.

Таким образом, в хорошо развитых профилях выветривания плоских вершин эрозионно-денудационных останцев явно выделяются две зоны: зона структурного элювия и зона бесструктурного элювия. Своеобразный карбонатный состав материнских пород привел к развитию здесь молодых кор выветривания обломочного типа. Отсутствие относительно мощной развитой зоны химического выветривания связано с постоянным выносом тонкодисперсного материала плоскостными водами атмосферных осадков к подошве останцев, где из них формируются пролювиально-делювиальные шлейфы.

Таким образом, основываясь на выполненных исследованиях, на территории Бугульминского плато можно выделить следующие разновидности элювия (рис. 1, 2):

1) бесструктурный элювий — сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м.

В бесструктурном элювии можно выделить также слой карбонатной муки, характеризующийся 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. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

2) структурный элювий — сложен плотными, слабо трещиноватыми известняками с преобладанием в составе микрозернистого кальцита. 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, структура изменяется от блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность слоя варьирует от 0,5 до 2,8 м.



Рис. 1. Обнажение карбонатных пород у п.Райлан в Бугульминском районе Республики Татарстан (контакт зоны бесструктурного и структурного элювия)



Рис. 2. Обнажение карбонатных пород у п. Бакалы в Бавлинском районе Республики Татарстан (структурный элювий)

Обе литологические разновидности встречаются на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев почти всех водосборных бассейнов и приуроченны к элювиальным и элювиально-делювиальным отложениям. Часто присутствует неполный профиль молодой коры выветривания с присутствием только небольшого слоя бесструктурного элювия за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала.

Ниже приводятся результаты оценки суффозионной пораженности по геологическим типам среды на изучаемой территории. Основные признаки, по которым проводилась типизация: особенности геолого-геоморфологической обстановки, характеристика гидрогеологических условий, а также современные рельефофор-мирующие процессы. Характеристика выделенных типов геологической среды приводится ниже.

Аккумулятивная пойма. Современные аллювиальные образования слагают поймы и русла всех рек района (абс. отм. 40–70 м). Основными крупными реками являются Ик, Степной Зай, Дымка, Шешма. Общая мощность аллювия крупных рек колеблется от 10 до 25 м, средних и малых от 7 до 16 м. Подстилающие горные породы — отложения неогена (N_2) — пески и глины. Карстово-суффозионные процессы не развиты в данном типе рельефа.

Эрозионно-аккумулятивные террасы рек. Низкие террасы рек (первая и вторая) сложены аллювиальными отложениями. Террасы аккумулятивные, подошва аллювия в долинах крупных и средних рек находится на 5,0–13,0 м ниже меженных урезом рек, а кровля возвышается над ними на 8,0–12,0 м. Мощность аллювия в долинах крупных рек достигает 14,0–22,0 м, малых и средних 9,0–18,0 м. Подстилающие породы — отложения неогена (N_2), частично, а также уфимского (P_{2u}) и казанского ярусов (P_{2kz}). Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст. Количество воронок 370 шт. Распределение провалов на террасах рек неравномерное. Воронки здесь имеют преимущественно конический или провальный профиль ($d = 3,0–35,0$ м), местами они образуют линейно-вытянутые цепочки. Наибольшие пораженные участки длиной более 35 км, вытянутые вдоль первой и второй надпойменных террас (абс. отметки 70–110 м), наблюдаются в долинах рек Ик, Шешма, Степной Зай. Дно воронок чаще всего заболочено, либо к ним приурочены озера. Самые крупные формы имеют размеры — $d=50–120$ м. Уклон поверхности составляет 1–3°. Средняя плотность воронок составляет 0,22 шт./км². Пораженность территории провалами — 1,3 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к умеренно опасной.

Эрозионно-аккумулятивные нижние части склонов. Аллювиально-делювиальными отложениями сложены высокие террасы крупных рек (нерасчлененные третья и четвертая) или же нижние части склонов вдоль террас малых рек (абс. отметки 110–140 м). Подстилающие породы — это частично отложения уфимского яруса (P_{2u}) и преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Поверхность нижней части склонов сложена маломощной толщей аллювиально-делювиальных отложений до 1,5 м. Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст и проявления на отдельных участках процесса суффозии. Количество суффозионных воронок — 137 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Карстовые формы расположены чаще в склоновой части долин рек. Оседания имеют форму блюдец или воронок ($d=3,0–15,0$ м). Уклон поверхности составляет 3–6°. Плотность воронок — 0,1 шт./км². Пораженность территории провалами — 0,65 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к малоопасной.

Эрозионные поверхности средней части склонов сложены делювиально-пролювиальными отложениями, располагающимися на длинных пологих склонах долин рек Ик, Дымки, Ютаза, Степной Зай и др. на различных гипсометрических уровнях от 140 до 180 м. Состав и строение делювиально-пролювиальными отложений зависит от строения склона, его крутизны и высоты, но, как правило, это блоки, глыбы и обломки коренных пород, смятые, перемещенные вниз, перемешанные со щебнисто-суглинистым материалом четвертичного возраста. Мощность таких образований чаще всего составляет в среднем 3,0–5,0 м, иногда может увеличиваться до 10–15 м. Вверх по склону мощность их сокращается до 2,0–3,0 м. Подстилающие породы преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Для этого типа рельефа характерны карстово-суффозионные процессы. Количество суффозионных воронок — 124 шт. Распределение провалов на территории неравномерное, воронки преимущественно имеют конусообразную форму ($d=0,3–2,0$ м). Уклон поверхности составляет 6–10°. Плотность воронок — 0,11 шт./км². Пораженность территории провалами — 0,66 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к малоопасной.

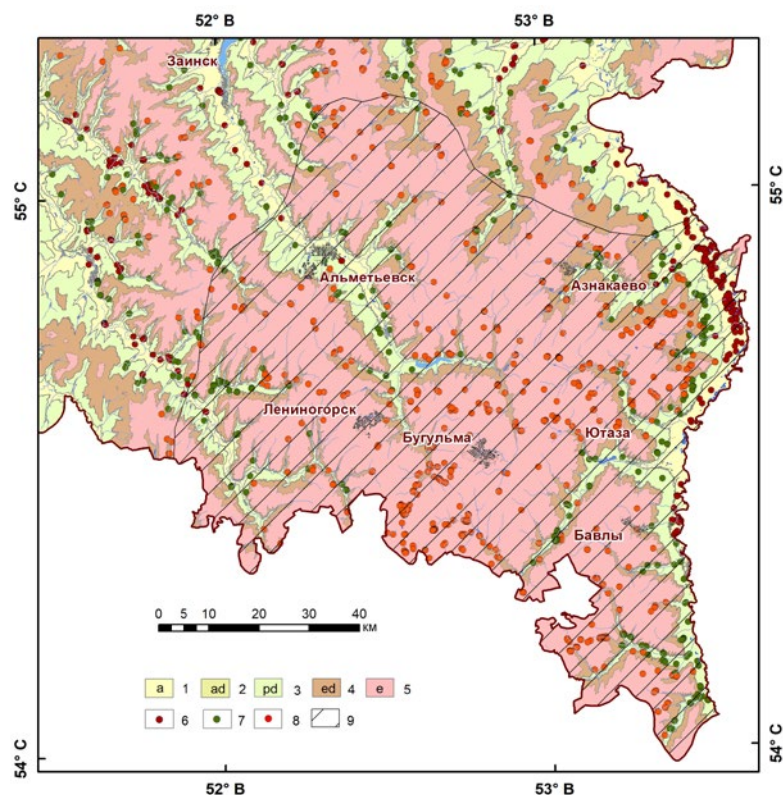
Эрозионно-денудационные поверхности при водораздельных частях склонов. Приводораздельные части склонов сложены преимущественно элювиально-делювиальными отложениями. Они слагают верхние части склонов речных долин и склоны водоразделов на различных гипсометри-

ческих уровнях от 180 до 220 м. Состав элювиально-делювиальных образований в значительной мере определяется свойствами подстилающих пород преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Мощность элювиально-делювиальных образований в целом примерно в два раза выше, чем элювиальных и колеблется от 0,7 до 7,0–9,5 м. Для этого типа рельефа характерно развитие суффозионных процессов. Количество суффозионных воронок — 102 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму ($d=0,3–5,0$ м). Уклон поверхности составляет 10–28°. Плотность воронок — 0,06 шт./км². Пораженность территории провалами — 0,65 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к незначительно опасной.

Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов. Грунтовые толщи изучаемой территории сложены преимущественно элювиальными отложениями с разной мощностью распространения. Наименьшие мощности, не превышающие обычно первых метров, характерны для элювиальных отложений, развитых на высоких водо-

разделах (верхнее плато) с абс. отм. 280–370 м. Наибольшая мощность элювиальных отложений наблюдается на территориях низких водоразделов (нижнее плато) с абс. отм. 220–280 м и изменяется от 0,5 до 10,0 м. Подстилающие породы преимущественно казанского яруса (P_{2kz}) и, частично, на высоких водоразделах уржумского яруса (P_{2ur}). В зависимости от состава подстилающих пород выделяются терригенный, карбонатный или терригенно-карбонатный элювий. Для этого типа рельефа характерно активное протекание суффозионных процессов. Количество суффозионных воронок — 418 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму ($d=0,3–10,0$ м). Уклон поверхности составляет 0–3°. Плотность воронок — 0,1 шт./км². Пораженность территории провалами — 0,58 м²/км². Территория по карстово-суффозионной опасности относится к малоопасной.

На основании вышеизложенного анализа была построена карта распространения геолого-геоморфологических процессов для разных типов рельефа территории Бугульминского плато (рис. 3).



Эрозионно-денудационные, эрозионно-аккумулятивные поверхности и их склоны: 1-аллювиальные отложение поймы и террас рек; 2- аллювиально-делювиальные отложения высоких террас крупных рек (третья и четвертая- нерасчлененные) или же нижние части склонов вдоль террас малых рек; 3- делювиально-пролювиальные отложениями, располагающиеся на средней части склонах долин; 4- элювиально-делювиальные отложения на приводораздельных частях склонов; 5- элювиальные отложения на водоразделах

Формы рельефа: 6- участки проявления карста; 7- участки проявления карстово-суффозионного процесса; 8- участки проявления процесса суффозии.

Таким образом, показатели карстово-суффозионной опасности территории связаны как со свойствами подстилающих пород, так и с геоморфологическим строением, которое в свою очередь зависит от расположения долин крупных рек и их притоков, формирующих гидрогеологический режим территории.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил выделить две зоны: структурного и бесструктурного элювия. Различия в сложении и структурных особенностях грунтов этих зон предполагают разные подходы к изучению их физико-механических свойств.

Отложения зоны бесструктурного элювия молодых кор выветривания можно отнести к классу дисперсных несвязных грунтов, а именно, к дресвяно-щебнистым разновидностям крупнообломочных грунтов. На рисунке 1 приведен пример бесструктурного элювия, вскрытого рядом с п. Райлан Бугульминского района Республики Татарстан. Для оценки его суффозионности, как было опи-

сано выше, применялась методика, разработанная ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [6,7]. Результаты исследований сведены в таблицу 1.

Исходя из результатов выполненных лабораторных работ и последующего анализа (105 образцов), становится очевидным, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми.

Зону развития структурного элювия по всем признакам можно отнести к скальным грунтам трещиноватых массивов, суффозионная устойчивость которых определяется степенью их трещиноватости. По этой причине для таких грунтов были сделаны расчеты геометрических параметров экзогенных трещин разгрузки и размеров отдельностей в бортах карьеров, вскрытых обнажений и шурфов. При этом оценка была выполнена отдельно для зон разной степени изменения.

В таблице 2 представлены результаты лабораторных и полевых исследований структурного элювия, распространенного на разных типах рельефа.

Таблица 1. Результаты оценки суффозионной опасности бесструктурного элювия

Морфогенетические группы рельефа	Диаметры частиц, мм				C_u	d_5/d_{17}	N	$d_0 \text{ max}$	$d_{cl} \text{ max}$
	d_5	d_{10}	d_{17}	d_{60}					
Эрозионные поверхности склонов (30 образцов)	0,11	0,31	0,42	11,32	32,4	0,31	1,26	2,67	2,82
Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов (45 образцов)	0,19	0,30	0,48	9,20	30,7	0,40	2,77	3,69	3,84
Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов (30 образцов)	0,30	0,53	0,63	16,97	28,2	0,37	1,35	3,09	3,92

Таблица 2. Результаты исследований массивов структурного элювия Бугульминского плато

Морфогенетические группы рельефа	Зона трещиноватости	Размеры блоков	Rc0, МПа	kc	Rсжм	s, см2	S, см2	Kтр, %	Длина трещины (мин-макс), см
Эрозионные поверхности склонов (30 образцов)	Б	35x30	12,1	0,7	8,40	106,00	1050	10,1	0,5÷3,0
	В	35x35	94,0	0,9	84,60	52,50	1225	4,3	0,1-0,8
Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов (45 образцов)	Б	35x35	15,2	0,7	10,64	51,25	1225	13,7	0,25÷1,0
	В	35x30	82,0	0,9	73,80	12,90	1050	1,2	0,1÷0,5
Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов (30 образцов)	Б	15x25	14,2	0,7	9,94	51,25	375	13,7	0,25÷1,0
	В	35x30	89,0	0,9	80,10	12,90	1050	1,1	0,1÷0,5

Коэффициент трещинной пустотности $K_{тр}$ рассчитывался в соответствии с формулой

$$K_{тр} = \frac{s}{S} 100\%, \quad (12)$$

где s — суммарная площадь пустотности на участке, S — площадь всего участка.

Коэффициент структурного ослабления был определен по формуле

$$k_c = R_{сж}^M / R_{сж}^0 \quad (13)$$

где $R_{сж}^M$ — прочность на одноосное сжатие выветрелого массива грунта, $R_{сж}^0$ — прочность на одноосное сжатие ненарушенной породы.

Таким образом, на изучаемой территории в разрезах карбонатных массивов по мере увеличения интенсивности трещиноватости происходит последовательное ухудшение механических свойств пород. Прочные известняки переходят сначала в группу скальных грунтов средней, а затем — малой прочности.

Результаты и их обсуждения

Выполненные исследования выявили актуальность и сложность рассматриваемой задачи. Анализ имеющейся литературы показал, что территория Бугульминского плато, имеющая высокий уровень техногенного освоения, до сих пор остается практически не изученной с точки зрения суффозионной опасности.

В работе выполнен большой системный анализ, который позволил выделить все встречающиеся литологические разновидности элювия, выполнить его инженерную классификацию по степени выветрелости, в соответствии с общепринятыми методиками. На основании полевого обследования территории были определены зоны поражения суффозионными процессами, что необходимо учитывать при выполнении изысканий и проектировании.

Анализ существующих литературных источников выявил тот факт, что рассматриваемая проблема, хоть и охватывает огромные территории по всему миру, однако не имеет четкого и конкретного алгоритма решения. Главным недостатком большинства исследований является отсутствие комплексного подхода, учитывающего, с одной стороны, литологические особенности элювиальных грунтов, а с другой — выбор корректной методики оценки суффозионной опасности для грунтов различных зон выветривания. Часто исследователи [5,7] пренебрегают изучением суффозионных процессов, акцентируя внимание только на карсто-

вой опасности. Кроме этого, исследования на различных территориях [14,15,18], расположенных на разных континентах, показали, что во главу угла должен быть поставлен региональный фактор как совокупность геологических, климатических, антропогенных и других условий.

Заключение

В рамках выполненного исследования была дана характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато. Рассматриваемая проблема крайне актуальна как вследствие высокого техногенного освоения территории, так и повсеместного распространения элювиальных грунтов, которые в большинстве случаев являются суффозионно-неустойчивыми.

Полевое обследование показало, что исследуемая территория по интенсивности провалообразования относится преимущественно к малоопасным, а в речных долинах и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай умеренно опасным. Общее количество зафиксированных суффозионных воронок составляет 1151 шт., средний диаметр которых равен 6,5 м, а максимальный — 35,0 м. Из этого следует, что при проектировании зданий и сооружений необходимо учитывать возможное развития суффозионных процессов.

Выполненный анализ показал, что на территории Бугульминского плато встречаются как разновидности структурного, так и бесструктурного элювия.

На основании результатов выполненных расчетов было установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми.

Суффозионная устойчивость структурного элювия в значительной степени зависит от трещиноватости массива.

В связи с вышеизложенным представляется, что результаты описанных в статье исследований будут полезны при выполнении инженерно-геологических изысканий как для общей характеристики и классификации грунтовых массивов, так и при оценке суффозионной неустойчивости территорий.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение других площадей на Бугульминско-Белебеевской возвышенности, с целью построения региональных таблиц физико-механических свойств элювиальных грунтов, инженерно-геологических карт и разработки рекомендаций по строительному освоению территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов В.И., Блудорова Е. А., Фомичева Н. Л., Ясонов П. Г. Казанское Поволжье и Прикамье // Плиоцен и плейстоцен Волго-Уральской области. М.: Наука, 1981, с. 95–118
2. Аникеев А.В., Чумаченко С. А. Карстово-суффозионные провалы Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Геоморфология, 2011, № 3, с. 32–41
3. Бондарик Г.К., Пендин В. В., Ярг Л. А. Инженерная геодинамика, М: КДУ, 2007, 440 с.
4. Елкин В. А. Оценка карстовой опасности при инженерных изысканиях: обзор российских нормативных технических документов // Инженерные изыскания, 2018, № 11–12, с. 12–24
5. Зиангиров Р.С., Каширский В. И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2005, № 1, с. 12–16
6. П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. Ленинград: ВНИИГ им. В. Е. Веденеева, 1991
7. П56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. Санкт-Петербург: ВНИИГ им. В. Е. Веденеева, 1992.
8. Рагозин А. Л. Региональная оценка карстовой опасности и риска//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003, № 4, с. 33–52
9. Строкова Л.А., Епифанова Е. А. Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021, Т. 332, № 7, с. 95–106
10. Строкова Л.А., Леонова А. В. Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021, Т. 332, № 5, с. 49–59
11. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М: ГЕОС, 2003, 216 с.
12. Derakhshan-Babaei F, Nosrati K, Tihomirov D et al. Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. Geomorphology, 2020, p.363.
13. Latypov A, Zharkova N, Mouraviev F. Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction's point of view (by the example of Kazan, Russia)// Global View of Engineering Geology and the Environmental. Proceeding of the international symposium and 9th Asian regional conference of IAEG, Beijing, China. — 2013, p. 891–896
14. Mayne P. Stress-strain-strength-flow parameters from enhances in-situ tests// International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. 2001, p.27–48
15. Meyer N, Kuhwald M, Petersen J et al. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. Catena, 2021, p.199
16. Startsev A, Kasetsart. Soils on eluvium of Permian carbonate deposits and the change in their chemical properties under the influence of bog formation. Moscow University soil science bulletin (USA), 40(3): p.1–7
17. Xiaolidong M, Cohen J, Martin D et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape. Chemical Geology, 2019, p.527
18. Yongsheng Cheng. Analysis on mineralization geological conditions of Danchi metallogenetic belt. Guanxi, China. Procedia Environmental sciences 12, 2012, p.978–983