

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.2

### ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО БУГУЛЬМИНСКО- БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2022 г. А. И. Латыпов<sup>1,\*</sup>, А. Н. Гараева<sup>1,\*</sup>, О. В. Лунева<sup>1,\*</sup>, Э. А. Королев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
ул. Кремлевская, 4/5, Казань, 420008 Россия

\*E-mail: airatlat@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принята к публикации 01.10.2022 г.

Работа посвящена изучению территории Бугульминского плато, расположенной в юго-восточной части Республики Татарстан. Авторами предложен подход к оценке суффозионной опасности, основанный на интегральной оценке суффозионности бесструктурных элювиальных грунтов и параметров трещиноватости структурного элювия. На основании выделения литологических разновидностей грунтов, математических расчетов и экспериментальных исследований выполнено районирование исследуемой территории по степени суффозионной опасности с построением тематических карт в среде ArcMap 10.8. 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.

**Ключевые слова:** суффозионная неустойчивость, элювий, карбонатный грунт, кора выветривания, трещиноватость

DOI: 10.31857/S0869780922060066

#### ВВЕДЕНИЕ

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

Бугульминско-Белебеевская возвышенность полностью сложена осадочными породами пермского возраста, среди которых преобладают песчаники, известняки и доломиты казанского яруса. Отдельные вершины останцев сложены красноцветными глинами, мергелями, доломитами и песчаниками уржумского яруса. Более молодые отложения на возвышенностях отсутствуют, за исключением плиоцен-четвертичных пролювиальных и делювиальных шлейфов, а также почвенного покрова. Элювиальные грунты на исследуемой территории широко распространены и встречаются практически повсеместно.

Элювиальные грунты зоны гипергенеза обладают высокой степенью структурной неоднородности, склонностью к механической и химической суффозии, характеризуются снижением прочности и увеличением сжимаемости при водонасыщении, дроблением крупнообломочных частиц элювия под воздействием строительных нагрузок от некоторых сооружений, что, согласно СП 22.13330.2016, обуславливает их принадлежность к категории специфических грунтов, требующих дополнительных инженерно-геологических исследований. На исследуемой территории преимущественно распространены карбонатные элювиальные грунты, повсеместно выходящие на дневную поверхность и часто являющиеся основанием фундаментов зданий и сооружений.

Территория Бугульминского плато характеризуется высокой антропогенной нагрузкой. На этой части РТ расположено несколько крупных городов, разрабатываются крупнейшие месторождения нефти (Ромашкинское, Ново-Елховское, Шугуровское), функционируют промышленные заводы и объекты химической, нефтяной и сельскохозяйственной промышленности. При этом инженерно-геологическая изученность ис-

следуемой территории значительно уступает восточной и центральной частям РТ, до настоящего времени малоизвестно об особенностях распространения элювиальных отложений в карбонатных массивах, слабо изучено их строение, степень выветрелости пород и изменение физико-механических свойств по разрезу.

Техногенное освоение территорий способствует значительной активизации природных и техно-природных процессов. Тектоника территории, рельеф и его расчлененность, гипсометрическое положение пород относительно базиса эрозии, состав, структурно-текстурные особенности горных пород, их трещиноватость, раздробленность, гидрогеологические условия, климат создали благоприятные условия для проникновения агентов выветривания и образования элювиальных грунтов на изучаемой территории, а также развития неблагоприятных экзогенных процессов, таких как суффозия и карст.

Изученность карстово-суффозионных процессов на исследуемой территории довольно низкая. Серьезные исследования отражены в работах [2, 4], которые, тем не менее, посвящены преимущественно оценке карстовой опасности, мало затрагивая вопросы, связанные с оценкой суффозионных процессов. Вместе с тем наблюдения показывают, что в рельефе исследуемой территории преобладают именно суффозионные формы.

Изучению суффозионных процессов, развивающихся в элювиальных грунтах, посвящено много работ [11–16]. Основным теоретическим аспектом часто посвящены отдельные главы монографий [1, 3]. Недостатком большинства исследований является то, что процессы суффозии изучаются либо в рамках решения конкретной узкой практической задачи с применением расчетов по существующим методикам, например, [6, 7], либо на основании совместного учета действия наиболее существенных факторов развития неблагоприятных процессов [9, 10].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Первый этап исследований включал в себя анализ имеющихся материалов, таких как космоснимки, топографические планы, материалы инженерных изысканий. Для первичного поиска характерных форм рельефа использовался программный комплекс SASPlanet, позволяющий достаточно уверенно диагностировать деформации рельефа диаметром более 3 м.

Второй этап заключался в рекогносцировочном маршрутном обследовании изучаемой территории с изучением литологического строения элювиальных карбонатных грунтов во вскрытых разрезах зоны гипергенеза. Активно исследова-

лись как существующие, так и недействующие карьеры добычи карбонатных пород, обнажения, шурфы и расчистки. Все горные выработки подвергались детальному описанию, фотодокументации и отбору образцов для дальнейших лабораторных исследований. В общей сложности обследована 201 точка наблюдения, расположение которых показано на геоморфологической карте (рис. 1).

На третьем этапе были проведены лабораторные исследования грунтов. Для бесструктурного элювия, представленного преимущественно карбонатной мукой с различной степенью включений дресвы и щебня, определялись гранулометрический состав и параметры физического состояния.

Структурный элювий оценивался как по прочности слагающих его горных пород, так и его трещиноватости. За методическую основу исследований суффозионной устойчивости были приняты известные методики ВНИИГ [6, 7], согласно которым массив грунта рассматривается одновременно и как дисперсная среда, и как трещиноватый массив. Для дисперсной части элювия (карбонатной муки преимущественно с включениями дресвы и щебня) основой расчета на суффозионность являются параметры, вычисляемые на основании тех или иных характеристик гранулометрического состава.

Согласно [7], несуффозионность грунта считается обеспеченной, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц ( $d_{\min}$ ). Частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте ( $d_{ci}^{\max}$ ), называются суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта.

При выполнении условия

$$d_{ci}^{\max} = 0.77d_0^{\max} > d_{\min}, \quad (1)$$

грунт следует считать суффозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна диаметру суффозионных частиц ( $d_{ci}$ ).

При выполнении условия

$$d_{ci}^{\max} = 0.77d_0^{\max} < d_{\min}, \quad (2)$$

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

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

$$d_0^{\max} = xC \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (3)$$

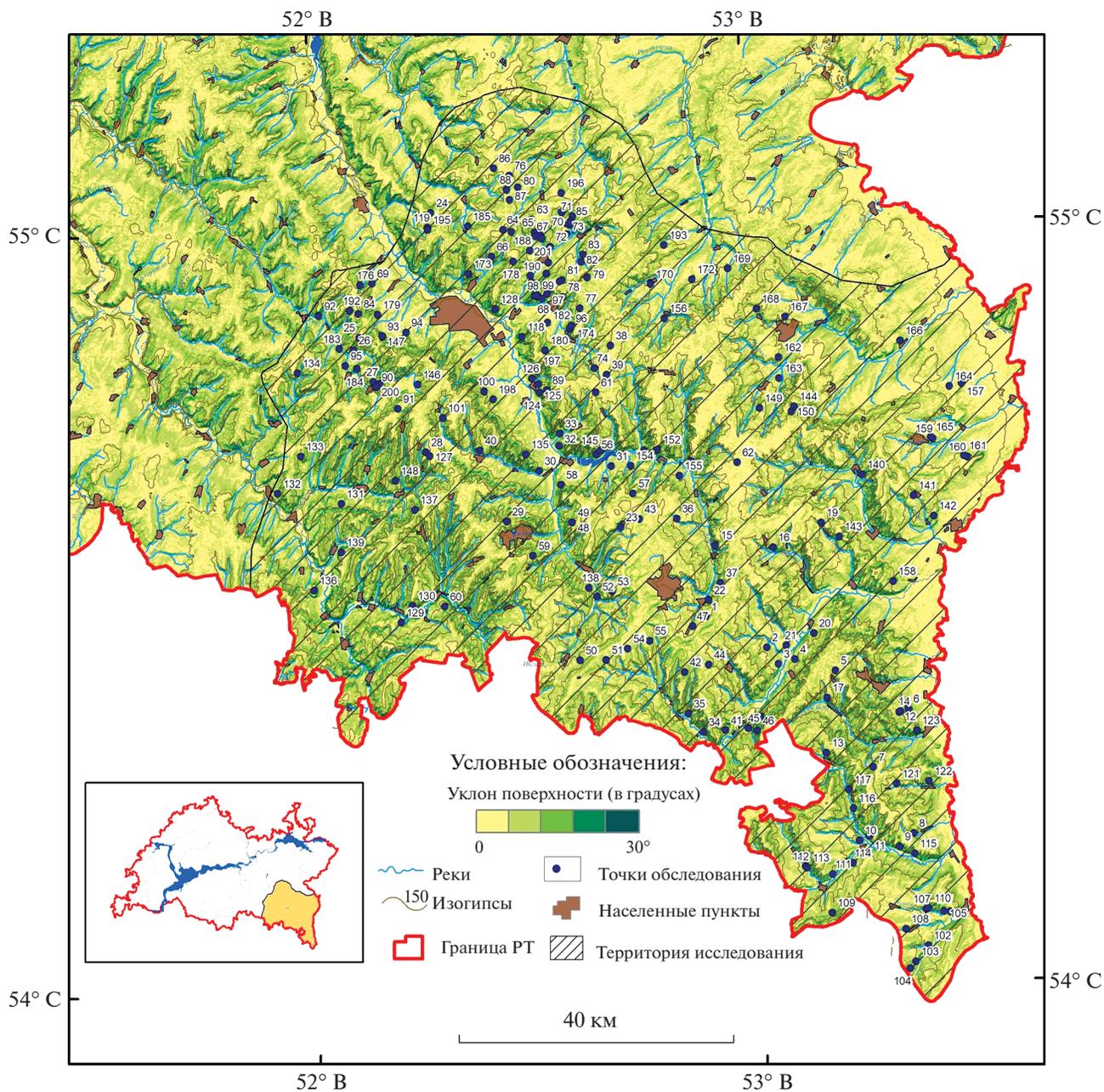


Рис. 1. Геоморфологическая карта территории Бугульминского плато с точками обследования.

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

$$C = 0.46\sqrt[6]{C_u} \tag{4}$$

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

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

$$x = 1 + 0.05C_u, \tag{5}$$

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

$$x = 0.35(2 + \sqrt{C_u}), \tag{6}$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{7}$$

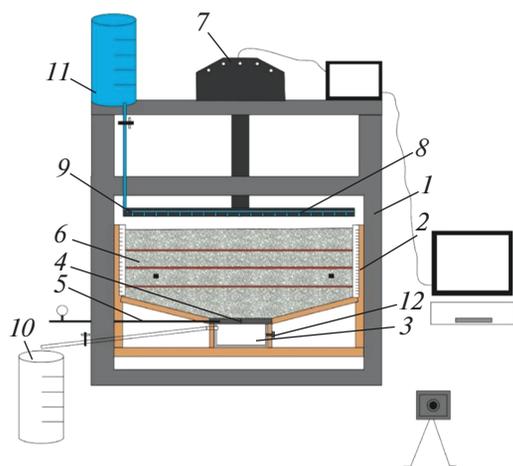
Другим критерием несущности грунта является выполнение условия:

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \tag{8}$$



(a)

(б)



**Рис. 2.** Внешний вид (а) и схема (б) устройства для определения суффозионной устойчивости грунтов: 1 – рабочая прозрачная камера; 2 – суффозионный лоток; 3 – прозрачный грунтосорбник; 4 – раздвижная полая щель; 5 – регулятор раскрытия щели; 6 – исследуемый грунт; 7 – электромеханическое вертикальное нагружающее устройство; 8 – нагруженный штамп; 9 – система капельного полива; 10 – мерная емкость; 11 – напорный бак; 12 – датчик мутности.

где

$$N = 0.10\sqrt[3]{C_u}(2 + \sqrt{C_u})\frac{n}{1-n}. \quad (9)$$

Физический смысл условия (8) заключается в предположении, что устойчивость грунта практически не нарушается, если вынос самых мелких частиц будет менее 3–5% по массе.

Зона развития структурного элювия на территории Бугульминского плато по всем признакам приурочена к скальным грунтам трещиноватых массивов. В таких грунтах при расчете суффозионности преобладающее значение имеют параметры трещиноватости массива. Во время поле-

вого маршрутного обследования на характерных участках были заложены, описаны и задокументированы площадки трещиноватости для расчета геометрических параметров трещин, размеров отдельных и т.п. Основные результаты измерений опубликованы в более ранних работах авторов [5].

Недостатком вышеописанного расчетного способа является то, что в реальных условиях процесс суффозии может иметь быстро затухающий характер. Это может происходить как за счет отсутствия условий для транспортировки продуктов суффозии, так и за счет явления кольматации, поэтому важным является вопрос определения критических параметров трещин для каждой разновидности гранулометрического состава дисперсной части элювия. Для решения этой задачи авторами были проведены экспериментальные исследования на установке собственной разработки (патент № 2022110200 от 15.04.2022 “Устройство для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования”), показанной на рис. 2. Отличием установки от аналогичных является то, что моделирование процесса суффозии на трещиноватом скальном массиве производится в экспериментальном лотке больших размеров (1 × 1 × 0.25 м), в нижней части которого имеется раздвижная полая щель с возможностью плавного изменения ширины ее раскрытия в процессе эксперимента без прерывания процесса фильтрации. Управление нагружением вертикальной сжимающей нагрузкой, измерение деформаций осуществляется с помощью системы АСИС конструкции Научно-производственного предприятия “Геотек”.

Прозрачные стенки камеры позволяют визуально наблюдать характер протекания процесса суффозии. Момент начала суффозионного выноса грунта, его остановка вследствие кольматации и дальнейшее возобновление при достижении критического размера ширины раскрытия щели дополнительно контролируются в автоматическом режиме с помощью проточного датчика мутности.

Возможность создания вертикальной сжимающей нагрузки позволяет оценивать протекание процесса суффозии как в условиях природного напряженного состояния, так и при прогнозном нагружении.

Таким образом, в процессе эксперимента для грунтов различного гранулометрического состава имеется возможность инструментальной фиксации двух величин – начальной ширины раскрытия трещины  $t_0$ , соответствующей активизации суффозионного выноса самых мелких частиц, и критической ширины раскрытия  $t_{cr}$ , при дости-

жении которой процесс суффозии приобретает незатухающий характер.

На заключительном этапе исследований выполнялась камеральная обработка полученных материалов и была построена серия тематических карт в программной среде ArcMap 10.8. Топографической основой послужили электронная топографическая карта территории Республики Татарстан масштаба 1:200 000 и цифровая модель рельефа EarthExplorer.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов полевых и лабораторных исследований показал, что в пределах Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Подробное описание литологического строения, условий формирования и преобразования, распространенности в плане и по глубине приведено в более ранней работе авторов [5].

Резюмируя основные полученные результаты, отметим, что на исследуемой территории можно выделить разновидности элювиальных грунтов.

1. *Бесструктурный элювий* – сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания (рис. 3а). Мощность горизонта составляет от 0.3 до 0.6 м. В бесструктурном элювии можно выделить слой карбонатной муки (рис. 3б), 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 с блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность слоя варьирует от 0.5 до 2.8 м.

Обе литологические разновидности встречаются на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев почти на всех водосбор-



Рис. 3. Обнажения карбонатных пород у п. Райлан в Бугульминском районе и у п. Бакалы в Бавлинском районе Республики Татарстан (контакты зоны бесструктурного и структурного элювия).

ных бассейнах, приуроченных 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 [5].

Как было описано выше, для расчета суффозионности грунтов бесструктурного элювия была использована методика ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [6, 7]. Результаты изучения 201 гранулометрического состава грунтов бесструктурного элювия позволили выделить 15 разновидностей гранулометрического состава по коэффициенту неоднородности. В табл. 1 приведены осредненные результаты обработки параметров гранулометрического состава и рассчитываемых на их основе величин.

Видно, что условие (8) выполняется для грунтов с коэффициентом неоднородности  $C_u < 8$ . Диапазон  $C_u$  8–10 можно считать переходным между суффозионно-устойчивыми и суффозионно-неустойчивыми грунтами. Это хорошо корре-

**Таблица 1.** Результаты определений параметров суффозионной опасности бесструктурного элювия

$C_u$	Размер частиц $d$ , мм				$d_5/d_{17}$	$N$	$C$	$d_0^{\max}$ , мм	$d_{ci}^{\max}$ , мм	$t_0$ , мм	$t_{cr}$ , мм
	$d_5$	$d_{10}$	$d_{17}$	$d_{60}$							
0.0–2.0	0.15	0.17	0.23	0.33	0.66	0.03	0.15	0.04	0.03	0.1	0.4
2.0–4.0	0.11	0.12	0.15	0.38	0.70	0.05	0.24	0.05	0.04	0.1	0.4
4.0–6.0	0.08	0.12	0.19	0.64	0.41	0.09	0.41	0.13	0.10	0.2	0.4
6.0–8.0	0.18	0.21	0.25	1.60	0.72	0.13	0.31	0.24	0.20	0.2	0.4
8.0–10.0	0.03	0.11	0.16	1.50	0.19	0.27	1.02	0.53	0.44	0.4	1.0
10.0–12.0	0.05	0.12	0.18	1.70	0.29	0.29	1.09	0.64	0.49	0.5	1.1
12.0–14.0	0.04	0.12	0.14	2.00	0.29	0.36	1.20	0.67	0.51	0.5	1.2
14.0–16.0	0.03	0.08	0.10	1.50	0.30	0.42	1.44	0.59	0.46	0.6	1.4
16.0–18.0	0.03	0.07	0.11	1.65	0.27	0.59	1.81	1.00	0.77	0.7	1.3
18.0–20.0	0.03	0.10	0.11	2.80	0.27	0.76	2.15	1.25	0.95	0.9	1.4
20.0–22.0	0.10	0.13	0.20	2.80	0.49	0.52	1.65	1.53	1.18	0.9	2.0
22.0–24.0	0.10	0.16	0.25	3.10	0.40	0.44	1.49	1.58	1.21	1.1	2.1
24.0–26.0	0.03	0.13	0.15	3.50	0.20	0.72	2.06	1.70	1.30	1.2	2.0
26.0–28.0	0.10	0.14	0.16	4.00	0.63	0.78	2.19	2.07	1.60	1.5	2.2
28.0–30.0	0.08	0.16	0.18	4.7	0.44	0.82	2.25	2.46	1.89	1.5	2.4

**Таблица 2.** Результаты полевых исследований трещиноватости структурного элювия

Степень трещиноватости	Количество площадок трещиноватости, шт	Модуль трещиноватости, М, %	Коэффициент трещинной пустотности, Ктп, %	Ширина раскрытия трещин, $t$ , мм
Очень слаботрещиноватые	39	<1.5	0.0–0.09	0.01–0.48
Слаботрещиноватые	51	1.5–5	0.1–0.5	0.1–1.0
Среднетрещиноватые	55	5–10	0.6–2.1	0.5–2.5
Сильнотрещиноватые	37	10–30	2.2–3.5	0.5–4.5

лирует и с результатами лабораторных исследований в экспериментальной установке. Для грунтов с  $C_u > 8$  наблюдается более чем двукратный рост значения как начальной ширины раскрытия трещины  $t_0$ , так и критической ширины раскрытия  $t_{cr}$ .

Как можно видеть из табл. 1, для этого диапазона также характерно резкое изменение диаметра наибольшего фильтрационного хода в грунте  $d_{ci}^{\max}$  с 0.20 в предыдущем диапазоне до 0.44, но для грунтов с  $C_u$  до 16 это изменение незначительно. А для грунтов с  $C_u$  от 16 до 30 параметр  $d_{ci}^{\max}$  отличается от значений в диапазоне 10–16 в 2–4 раза.

Существенное изменение критической ширины раскрытия трещины  $t_{cr}$  наблюдается лишь для грунтов с  $C_u > 20$ . Для таких грунтов, по всей видимости, суффозионность должна оцениваться по формулам, отличным от предлагаемых в существующих методиках.

На основании полученных данных было выполнено районирование территории Бугульминского плато по коэффициенту неоднородности в среде ArcMap 10.8.

На этапе полевых исследований в различных частях исследуемой территории были заложены и изучены 182 площадки трещиноватости. На основании полученных материалов все результаты были объединены в группы по степени трещиноватости согласно ГОСТ 25100–2020. Результаты исследований представлены в табл. 2.

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

На основании объединенных данных полевых и лабораторных исследований, выполненных расчетов и результатов моделирования была построена интегральная карта суффозионной опасности территории Бугульминского плато (рис. 4),

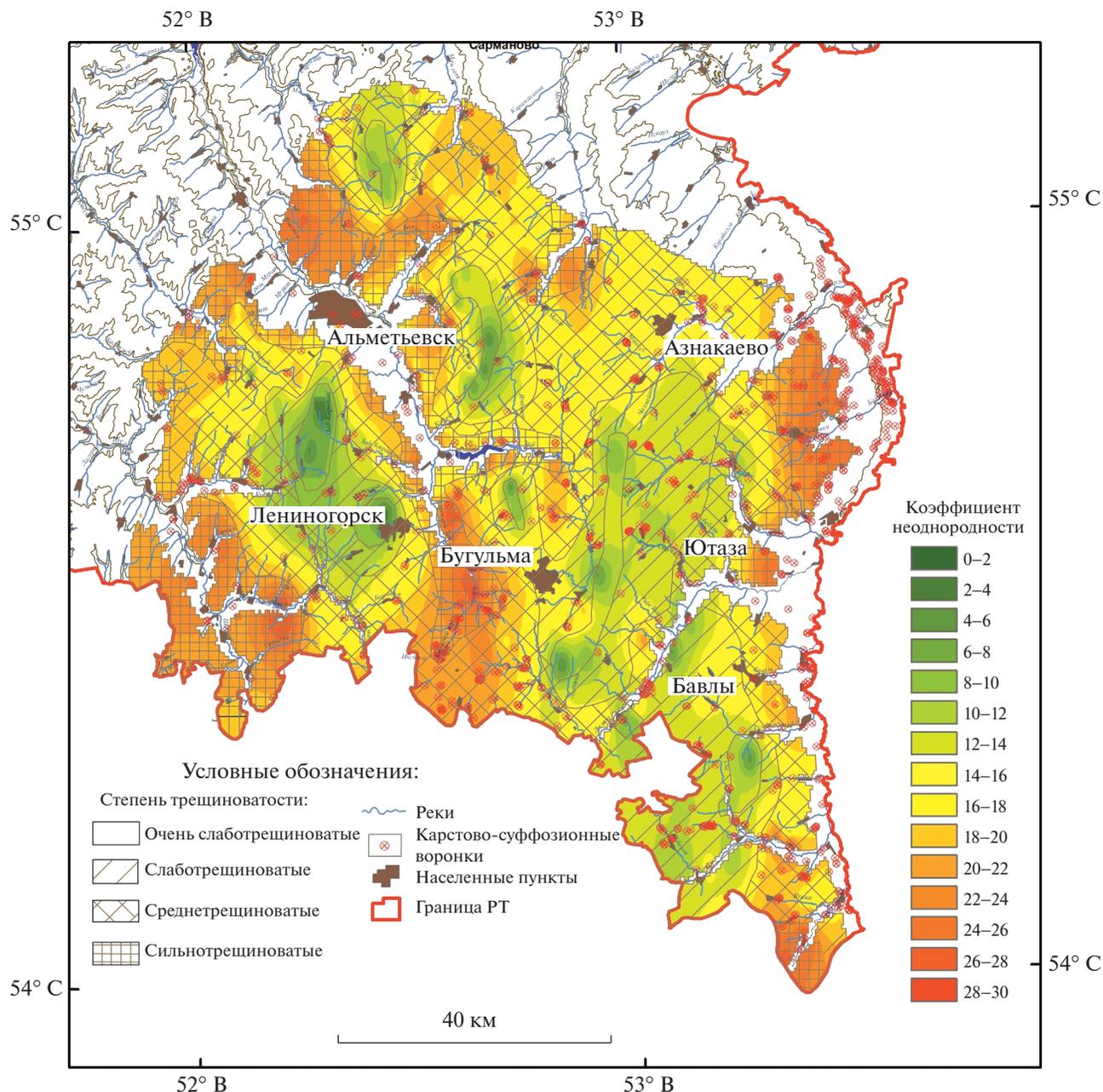


Рис. 4. Интегральная карта суффозионной опасности на территории Бугульминского плато.

учитывающая как суффозионную неустойчивость грунтов бесструктурного элювия, так и трещиноватость подстилающего структурного элювия.

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

Анализ полученной интегральной карты позволил сделать следующие заключения.

Наибольшая суффозионная опасность развита на эрозионно-аккумулятивных нижних, средних частях склонов вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участок характеризуется высокими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ( $C_u$  – 19–30), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к средне- и сильнотрещиноватым. Воронки на этих участках часто имеют провальный тип, а их диа-

метр достигает 10 м и более, поэтому можно говорить об одновременном протекании карстовых и суффозионных процессов на этих участках. Этот вывод хорошо соотносится с построенной интегральной картой. Данные участки характеризуются одновременно и высокими значениями коэффициентов неоднородности, и высокой степенью трещиноватости (участки красной заливки и плотной штриховки).

Наименьшая суффозионная опасность присуща эрозионно-денудационным водоразделам с наивысшими абсолютными отметками поверхности, в междуречьях рек Шешма и Степной Зай, рек Степной Зай и Мелля, рек Степной Зай, Ик и Дымка, рек Дымка Ик и Киндыз. Территория характеризуется низкими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ( $C_u - 0-10$ ), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к очень слаботрещиноватым. На интегральной карте эти участки соответствуют зонам зеленой заливки с отсутствием штриховки. При этом мощность элювия на этих участках достигает 6 м, однако проявления суффозионных и карстово-суффозионных процессов практически отсутствуют.

На других участках увеличение количества воронок соответствует увеличению коэффициента неоднородности бесструктурного элювия и трещиноватости пород структурного элювия.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Суффозионная опасность территории Бугульминского плато Бугульмино-Белебеевской возвышенности, несмотря на высокую антропогенную нагрузку и высокую степень пораженности карстово-суффозионными формами рельефа, на настоящий момент является практически неизученной.

Результаты исследований показали, что на изучаемой территории коры выветривания сложены преимущественно карбонатными элювиальными грунтами, представленными разновидностями как структурного, так и бесструктурного элювия.

Подход к оценке суффозионной опасности, основанный на интегральной оценке ряда параметров суффозионности бесструктурных элювиальных грунтов и параметров трещиноватости структурного элювия, представляется перспективным для полноты учета большинства определяющих факторов.

Выполненное районирование территории Бугульминского плато может быть полезным при градостроительном планировании, выполнении инженерно-геологических изысканий и мониторинга за развитием карстово-суффозионных процессов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов В.И., Блудорова Е.А., Фомичева Н.Л., Ясенов П.Г.* Казанское Поволжье и Прикамье // Плиоцен и плейстоцен Волго-Уральской области. 1981. М.: Наука, 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., Ярз 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. *Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лулева О.В.* Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Грунтоведение. 2022. № 1 (18). С. 31–43.
6. П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. Ленинград: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 1991. URL: <https://law.rufox.ru/view/9/19491.htm>.
7. П 56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. СПб: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 1992. URL: <https://normacs.net/Doclist/doc/11FL0.html>
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. *Dong X., Cohen M., Martin J. et al.* Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape // Chemical Geology 2019. V. 527. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2018.05.021>
14. *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) // Proc. of the Int. symp. and 9th Asian regional conference of IAEG "Global View of Engineering Geology and the Environmental", Beijing, China. 2013. P. 891–896.

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. V. 199. № 105084. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105084>
16. Startsev A. 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*. 1985. V. 40. № 3. P. 1–7.

## INTEGRAL ASSESSMENT OF THE SUFFUSION HAZARD AT THE BUGULMA PLATEAU, THE BUGULMA-BELEBEY UPLAND

A. I. Latypov<sup>a,#</sup>, A. N. Garaeva<sup>a,#</sup>, O. V. Luneva<sup>a,#</sup>, and E. A. Korolev<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> Kazan Federal University,  
Kremlyovskaya ul., 18, Kazan, 420008 Russia

<sup>#</sup>E-mail: [airatlat@mail.ru](mailto:airatlat@mail.ru)

This paper deals with the study of the Bugulma plateau located in the southeast of the Tatarstan Republic. The suffusion hazard was assessed using an integral estimation of suffusion properties of incoherent eluvial soils and the parameters of structural eluvium fracturing. Using lithological varieties of soils, mathematical calculations and experimental studies, the territory zoning was carried out according to the suffusion hazard degree and the thematic maps were built in the ArcMap 10.8. The results of this study are useful for making preliminary design decisions in undeveloped areas, as well as for predicting the development of unfavorable engineering and geological processes in areas of existing buildings and structures.

**Keywords:** *suffusion instability, eluvium, carbonate soil, weathering crust, fracturing*

### REFERENCES

1. Aver'yanov, V.I., Bludorova, E.A., Yasonov, P.G. *Kazanskoe Povolzh'e i Prikam'e* [Kazan Volga and Kama regions]. *Pliotsen i pleistotsen Volg-Ural'skoi oblasti* [Pliocene and Pleistocene in the Volga-Urals region]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 95–118. (in Russian)
2. Anikeev, A.V., Chumachenko, S.A. *Karstovo-suffuzionnye provaly Bugul'minsko-Belebeevskoi vozvyshennosti* [Karst and suffusion sinkholes at the Bugul'ma-Belebeey Upland]. *Geomorfologiya*, 2011, no. 3, pp. 32–41. (in Russian)
3. Bondarik, G.K., Pendin, V.V., Yarg, L.A. *Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2007, 440 p. (in Russian)
4. Yolkin, V.A. *Otsenka karstovoi opasnosti pri inzhenernykh izyskaniyakh: obzor rossiiskikh normativnykh tekhnicheskikh dokumentov* [Karst hazard assessment upon engineering survey: a review of the Russian technical standard documents]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2018, no. 11–12, pp. 12–24. (in Russian)
5. Latypov, A.I., Garaeva, A.N., Luneva, O.V. *Kharakteristika suffuzionnoi opasnosti territorii Bugul'minskogo plato Bugul'minsko-Belebeevskoi vozvyshennosti* [Characteristics of suffusion hazard at Bugul'ma Plateau of the Bugul'ma-Belebeey Upland]. *Gruntovedenie*, 2022, no. 1 (18), pp. 31–43. (in Russian)
6. P 49–90 (VNIIG). *Rekomendatsii po metodike laboratornykh ispytaniy gruntov na vodopronitsaemost' i suffuzionnyu ustoychivost'* [Recommendations on the methods of laboratory testing of soils for water penetrability and suffusion stability]. Leningrad, VNIIG im. V.E. Vedeneeva, 1991. URL: <https://law.rufox.ru/view/9/19491.htm> (in Russian)
7. P 56–90 (VNIIG). *Rekomendatsii po proektirovaniyu obratnykh fil'trov gidrotekhnicheskikh sooruzhenii* [Recommendations on projecting reverse filters of hydraulic power engineering structures]. St. Petersburg, VNIIG im. V.E. Vedeneeva, 1992. URL: <https://normacs.net/Doclist/doc/11FL0.html> (in Russian)
8. Ragozin, A.L. *Regional'naya otsenka karstovoi opasnosti i riska* [Regional assessment of karst hazard and risk]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2003, no. 4, pp. 33–52 (in Russian)
9. Strokova, L.A., Epifanova, E.A. *Otsenka suffuzionnoi opasnosti territorii pos.Sabetta (poluostrov Yamal)* [Suffusion hazard assessment in the Sabetta settlement territory (Yamal Peninsula)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2021, vol. 332, no. 7, pp. 95–106. (in Russian)
10. Strokova, L.A., Leonova, A.V. *Otsenka suffuzionnoi opasnosti na territorii g. Tomsk* [Suffusion hazard assessment in the Tomsk territory]. 2021, vol. 332, no. 5, pp. 49–59 (in Russian)
11. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
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. Dong, X., Cohen, M., Martin, J. et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst landscape. *Chemical Geology*, 2019, vol. 527. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2018.05.021
14. 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) // Proc. of the Int. Symp. and 9th Asian regional conference of IAEG "Global View of Engineering Geology and the Environmental", Beijing, China, 2013, pp. 891–896.
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, vol. 199, no. 105084. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105084.
16. Startsev, A. 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*, 1985, vol. 40, no. 3, pp. 1–7.