

# КАРБОНАТНЫЙ ЭЛЮВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ г. КАЗАНИ

## CARBONATE ELUVIUM IN THE KAZAN CITY AREA

### МУРАВЬЕВ Ф.А.

Доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии  
Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГиНГТ)  
Казанского (Приволжского) федерального университета  
(КФУ), к.г.-м.н., г. Казань, Россия,  
fedor.mouraviev@yandex.ru

### ЖАРКОВА Н.И.

Доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии ИГиНГТ  
КФУ, к.г.-м.н., г. Казань, kazannad@rambler.ru

### ЛАТЫПОВ А.И.

Доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии  
ИГиНГТ КФУ, к.т.н., г. Казань, airatlat@mail.ru

### MOURAVIEV F.A.

Associate professor of the department of general geology and hydrogeology of the Institute  
of Geology and Oil-and-Gas Technologies of the Kazan (Volga Region) Federal University,  
Kazan, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), fedor.mouraviev@yandex.ru

### ZHARKOVA N.I.

Associate professor of the department of general geology and hydrogeology of the Institute  
of Geology and Oil-and-Gas Technologies of the Kazan (Volga Region) Federal University,  
Kazan, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), kazannad@rambler.ru

### LATYPOV A.I.

Associate professor of the department of general geology and hydrogeology of the Institute  
of Geology and Oil-and-Gas Technologies of the Kazan (Volga Region) Federal University,  
Kazan, PhD (candidate of science in Technics), airatlat@mail.ru

### Ключевые слова:

карбонатный элювий; физико-механические свойства грунтов;  
пермские отложения; доломит; трехосные испытания;  
суффозия; карстовые и суффозионные процессы.

### Key words:

carbonate eluvium; physical-mechanical properties of soils;  
Permian deposits; dolomite; triaxial compression tests; suffusion;  
karst and suffusion processes.

### Аннотация

Проведено картирование территории г. Казани по мощности и глубине залегания кровли карбонатного элювия. Представлены результаты исследования литолого-минералогических, физических и физико-механических свойств этих отложений, отобранных в одной из скважин с глубин 50–120 м. Показано, что состав и свойства карбонатного элювия определяются геологической историей его формирования, а наиболее устойчивым минералом в его составе является доломит. Указано, что оптимальным методом лабораторных испытаний данного грунта является трехосное сжатие, причем схема испытания должна выбираться в зависимости от доли присутствующего в нем древесново-щебнистого материала. Рекомендовано при изысканиях в районах развития карбонатного элювия уточнять результаты лабораторных исследований, используя данные полевых испытаний. Приведены примеры опасных геологических процессов на территориях с неглубоким залеганием карбонатного элювия.

### Abstract

The burial depths and thickness of carbonate eluvium are mapped in the Kazan city area. Results of investigation of the lithological, mineralogical, physical and mechanical properties of these deposits sampled from one of the boreholes at the depths of 50-120 m are presented. It is shown that the composition and properties of carbonate eluvium are determined by the geological history of its forming, the most stable mineral in its composition is dolomite. It is pointed out that the optimal method of laboratory investigation of this soil is triaxial compression testing and the test pattern is chosen according to the proportion of coarse-grained material in it. The authors recommend to improve laboratory test results using field testing data for engineering geological surveys in carbonate eluvium areas. Some examples of dangerous geological processes in the areas of shallow bedding of carbonate eluvium are given.

### Введение

Широкое распространение карбонатного элювия, относимого к особому типу грунтов, на территории г. Казани и интенсивное освоение геологической среды в последние годы обусловили необходимость выработки оптимальных методов исследования этих отложений. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена увеличивающимися объемами строительства, связанными с освоением подземного пространства (строительством метрополитена, паркингов, тоннелей, переходов и др.), возведением высотных зданий со сложными конструктивными решениями фундаментов, расширением границ города.

При инженерных изысканиях, проводимых на различную глубину в г. Казани, инженеры-геологи по-разному подходят к диагностике и физико-механическим испытаниям карбонатного элювия. Большинство исследователей описывают его как скальный грунт (доломит, известняк), приводя в качестве прочностных характеристик лишь предел его прочности на одноосное сжатие. Другая часть инженеров-геологов диагностирует карбонатный элювий как «карбонатно-глинистую муку» и использует методики, применяемые при исследованиях дисперсных грунтов, такие как компрессионное сжатие или одноплоскостной срез. При этом неясно, каким образом удастся изготовить образцы небольших размеров из монолитов, содержащих большое количество включений обломков карбонатных пород, и как оценивается влияние этих включений на получаемые результаты.

В задачи настоящего исследования входило получение новых более детальных данных относительно распространения, мощности, условий залегания, состава и деформационно-прочностных свойств карбонатного элювия на территории г. Казани.



## Геолого-гидрогеологические условия

Исследуемая территория расположена на востоке Русской платформы в пределах Волго-Уральской антеклизы. Ее геологическое строение характеризуется развитием мощного палеозойского осадочного чехла, в верхней части которого развит комплекс преимущественно морских отложений пермской системы.

Отложения сакмарского яруса нижней перми ( $P_1s$ ) представлены переслаивающимися загипсованными доломитами и гипсами с редкими прослоями песчаников и алевролитов (мощностью от 80 до 115 м). Выше с размывом залегают отложения казанского ( $P_2kz$ ) и уржумского ( $P_2ur$ ) ярусов средней перми. Карбонатные породы представлены мергелями, известковистыми доломитами и доломитизированными известняками, большей частью органогенными, иногда окремнелыми. Карбонатные пачки мощностью от долей до первых десятков метров преобладают в средней части отдела, чередуясь с терригенными пачками (песчаников, алевролитов, глин) [2].

Пермские отложения образуют серию плакантиклиналей северо-западного простирания с амплитудой до 80 м, на крыльях которых породы характеризуются повышенной трещиноватостью, часто разрушенностью до дисперсного состояния. Более того, отложения уржумского яруса ( $P_2ur$ ), а также значительная часть отложений верхнеказанского подъяруса ( $P_2kz_2$ ) размывы в результате эрозии при формировании неоген-четвертичных долин рек Волги, Казанки и их притоков. Верхнеказанские ( $P_2kz_2$ ) преимущественно карбонатные пачки, а также терригенно-карбонатная толща уржумского яруса ( $P_2ur$ ) частично сохранились лишь в пределах восточного коренного берега Волги, а также на

крыльях плакантиклиналей, где их суммарная мощность не превышает 130 м (рис. 1) [7].

На дислоцированной и элюзированной поверхности размыва пермских пород залегают сложнопостроенный комплекс погребенных плиоценовых долин ( $N_2$ ) и четвертичных аллювиальных террас р. Волги и ее притоков (аQ). В большинстве случаев неоген-четвертичные отложения представлены песками различной крупности, супесями, суглинками и глинами. Максимальная мощность неоген-четвертичных отложений составляет около 180 м. Такие мощности характерны для осевой части плиоценовых врезов ( $N_2$ ), перекрытых аллювиальными супесчано-суглинистыми отложениями нижнего и среднего плейстоцена (аQ<sub>1-2</sub>).

В зоне активного водообмена выделяют следующие гидростратиграфические подразделения: водоносный (локально слабодоносный) четвертичный аллювиальный комплекс, водоносный плиоценовый аллювиальный комплекс, водонепроницаемый локально слабодоносный уржумский терригенный комплекс, водоносный казанский терригенно-карбонатный комплекс, водоносная сакмарская карбонатно-сульфатная серия. Из-за наличия глубоких плиоценовых врезов в зоне активного водообмена первые четыре комплекса образуют единую гидродинамическую систему. Воды — безнапорные, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевые, с минерализацией 0,3–0,7 г/дм<sup>3</sup>, в местах восходящей разгрузки нижнепермских вод (на крыльях антиклиналей, в тальвегах палеодолин) — от сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевых до сульфатно-кальциевых с минерализацией 1,5–2,0 г/дм<sup>3</sup>. Подземные воды водоносной сакмарской карбонатно-сульфатной серии — локально напорные, сульфатно-кальциевые, с минерализацией 1,5–2,7 г/дм<sup>3</sup> [2].

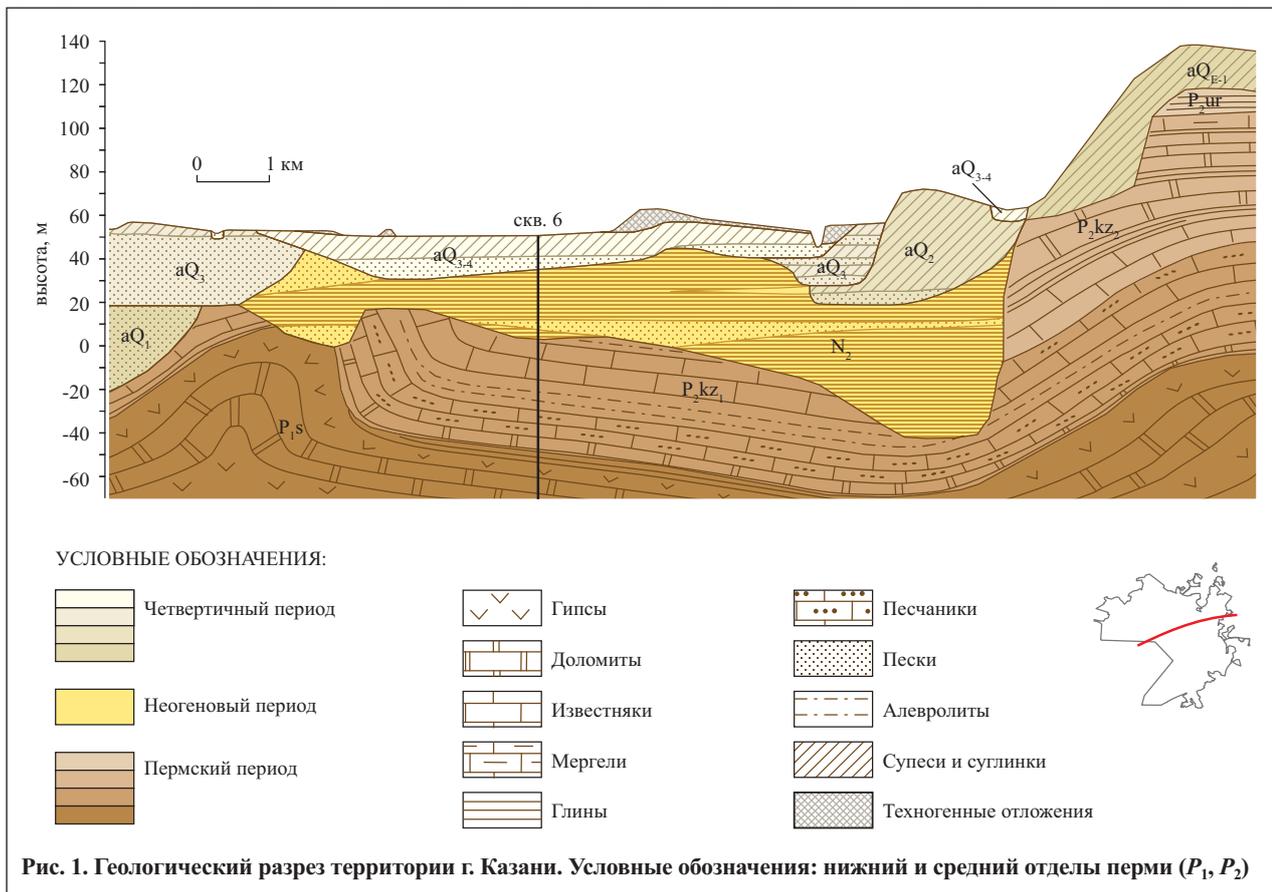


Рис. 1. Геологический разрез территории г. Казани. Условные обозначения: нижний и средний отделы перми ( $P_1, P_2$ )

Критерии районирования территории г. Казани по глубине залегания кровли выветрелых карбонатных пород		
Глубина залегания, м	Положение карбонатного элювия относительно элементов геологической среды	Процессы в зоне взаимодействия сооружений с геологической средой, обусловленные наличием карбонатного элювия
<20	Всегда входит в состав ЛТС	Растворение и/или суффозионное разуплотнение (природное и техногенное), неравномерные осадки, провалы, оседание поверхности. Плотность карстово-суффозионных воронок — более 1 шт./км <sup>2</sup>
20–30	Часто входит в состав ЛТС	Растворение и/или суффозионное разуплотнение (природное и техногенное), оседание поверхности. Плотность карстово-суффозионных воронок — менее 1 шт./км <sup>2</sup>
30–50	Редко входит в состав ЛТС	Редкие единичные карстово-суффозионные воронки
>50	Не входит в состав ЛТС	Процессы отсутствуют

### Методика исследований

Для установления положения толщ карбонатного элювия в пространстве авторами был проведен анализ баз данных скважинного материала (по 911 скважинам) с использованием программного продукта ArcView 3.3. Это позволило выполнить картирование видимой мощности карбонатного элювия в центральной части города, а также районирование на исследуемой территории по глубине залегания кровли выветрелых карбонатных пород (с привлечением данных из работы [9]), поскольку информация о мощности и положении в пространстве специфических грунтов такого типа, несомненно, имеет большое практическое значение (для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений).

При определении граничных значений классификационного показателя «глубина залегания» авторы опи-

рались, с одной стороны, на положение карбонатного элювия относительно элементов геологической среды, а с другой — на активность карстово-суффозионных процессов, которая в пределах равнинных территорий во многом определяется мощностью покровных нерастворимых отложений (см. таблицу). Так, на участках города, в пределах которых карбонатный элювий залегает на глубине более 50 м, неблагоприятные для сооружений явления, обусловленные наличием таких специфических грунтов, практически отсутствуют. На участках же с неглубоким залеганием выветрелых карбонатов (до 20 м), напротив, активно развиваются карстовые и суффозионные процессы, от которых нередко страдают сооружения, поскольку в условиях города с развитой подземной инфраструктурой такие грунты практически всегда входят в состав литотехнических систем (ЛТС). Именно на таких участках они наиболее подвержены техногенному

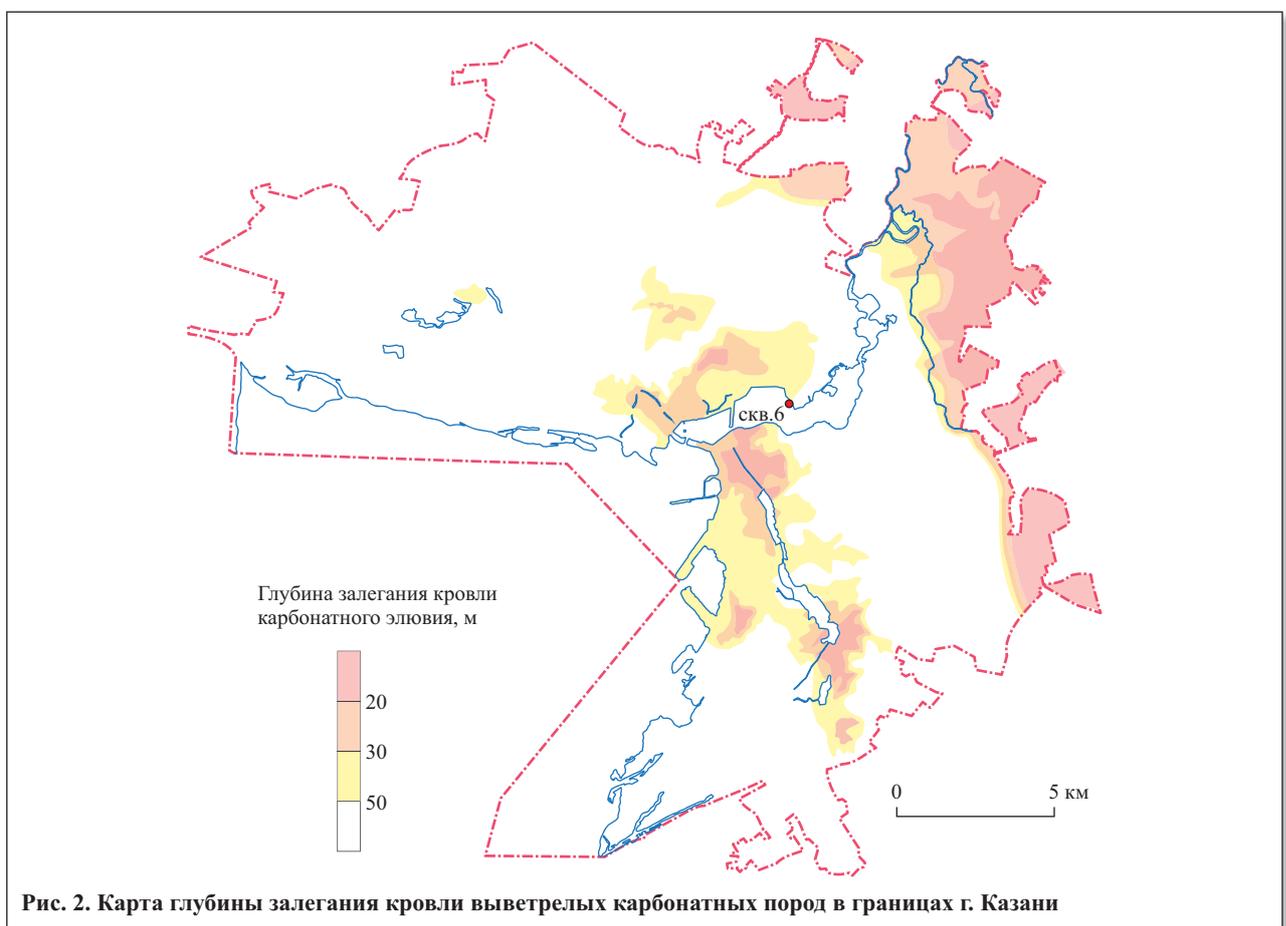


Рис. 2. Карта глубины залегания кровли выветрелых карбонатных пород в границах г. Казани



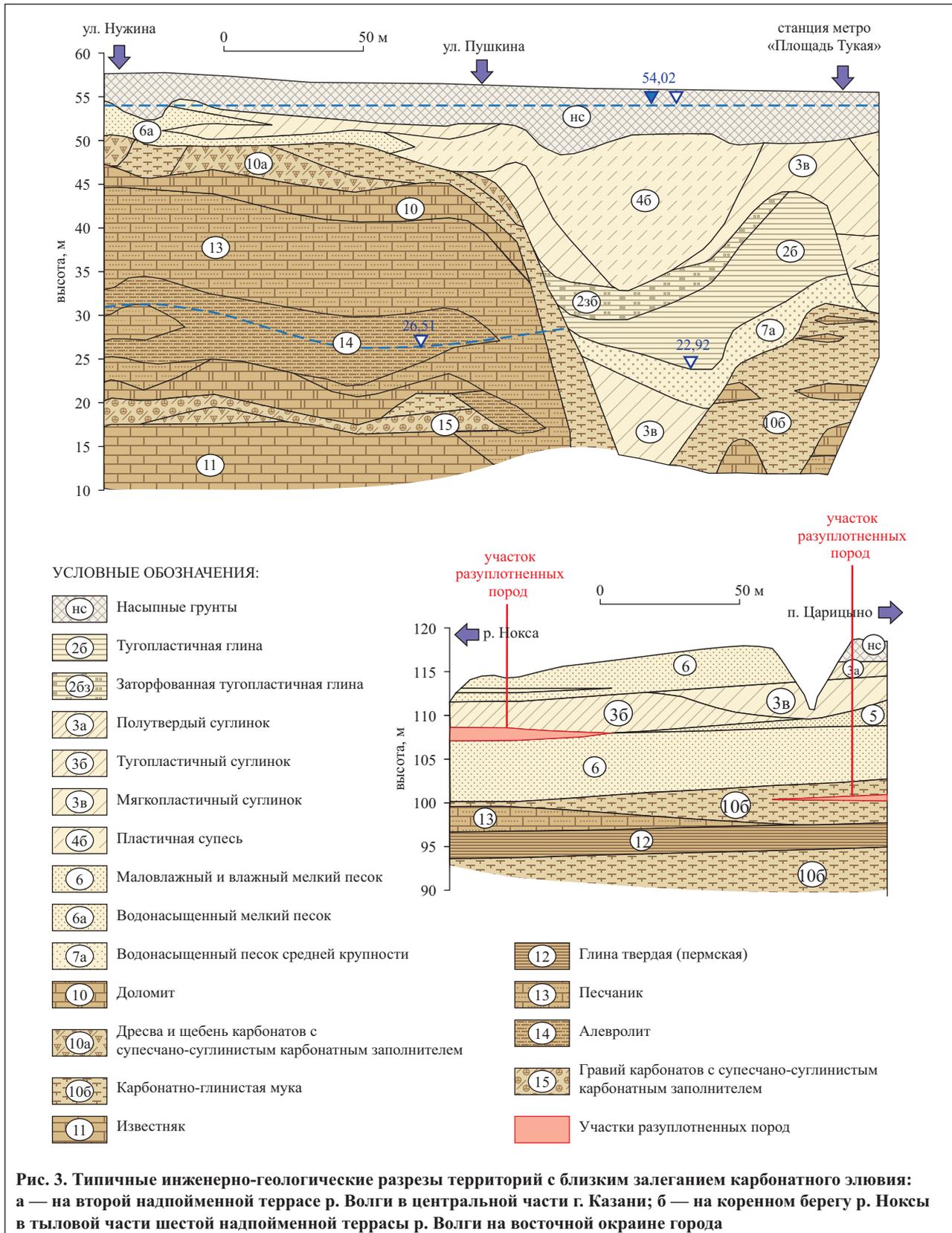
растворению и суффозионному разуплотнению. Для этих участков также характерна наибольшая плотность карсто-суффозионных форм.

Для исследования состава, строения и свойств карбонатного элювия детально изучался керн одной из скважин (скважины 6), пробуренной на правом берегу р. Казанки в 2012 г.

Для изучения строения данных отложений, размеров и формы обломков использовалась традиционная оп-

тическая микроскопия в проходящем свете. Некоторые образцы исследовались в ЦКП микроскопии Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ) на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионной приставкой SEM EVO GM (Carl Zeiss) (высокий вакуум, напряжение 25 кВ).

Для детализации минерального состава образцов проводился рентгенографический анализ на приборе SHIMADZU XRG-7000 в лаборатории фазового анали-



за Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГиНГТ) КФУ. Использовались преимущественно порошковые препараты, изготовленные по стандартной методике. Режимы съемки соответствовали поставленным задачам: диапазон от 3 до 38° (2Q), шаг 0,02 град./мин. при экспозиции 4 с,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение, напряжение на трубке 30 кВ.

Неоднородность строения и пространственное распределение пустот в карбонатном элювии изучались на образцах ненарушенной структуры методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ). Исследования проводились в лаборатории РКТ ИГиНГТ КФУ на приборе Phoenix V|tome|X S 240 с использованием микрофокусной трубки. Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 200 кВ и токе 700 мА, разрешение составляло 146 мкм.

Гранулометрический состав, а также все физико-механические свойства определялись в лаборатории механики грунтов ИГиНГТ КФУ на установках трехосного сжатия конструкции НПП «Геотек» и компании Wile Geotechnik.

Для механических испытаний были использованы образцы грунта ненарушенного сложения цилиндрической формы диаметром 50 и 100 мм, высотой 100 и 200 мм соответственно. Размеры образца принимались в зависимости от однородности грунта и величины включений.

В процессе испытаний фиксировались значения вертикального давления (МПа), давления в камере (МПа), давления поровой жидкости по верхнему и нижнему торцам образца (МПа), вертикальная дефор-

мация (мм), объемная деформация ( $\text{мм}^3$ ) и радиальная деформация в средней части образца (мм).

Предварительное обжатие (реконсолидация) образцов до восстановления природной плотности было выполнено по методу ВФС (восстановления двухфазного состояния).

Вертикальная нагрузка прикладывалась при ранее достигнутом давлении в камере и перекрытом дренаже при кинематическом режиме нагружения со скоростью 0,5% в минуту.

Определяемыми деформационными характеристиками являлись модуль деформации и коэффициент Пуассона, прочность образцов оценивалась по значению сопротивления недренированному сдвигу  $C_u$ . Для этого образцы грунта испытывались приложением вертикальной нагрузки при заданном всестороннем давлении до разрушения (достижения максимума осевой нагрузки) или до достижения относительной вертикальной деформации образца  $\varepsilon=0,15$ .

### Положение в пространстве и мощность карбонатного элювия

Положение кровли карбонатного элювия пространственно связано с поверхностью размыва пород средней перми. Можно выделить две зоны неглубокого залегания их кровли (менее 50 м) — восточную, примыкающую к левому коренному берегу р. Волги, и центральную, пространственно связанную с серией эрозионно-тектонических среднепермских останцов (рис. 2).

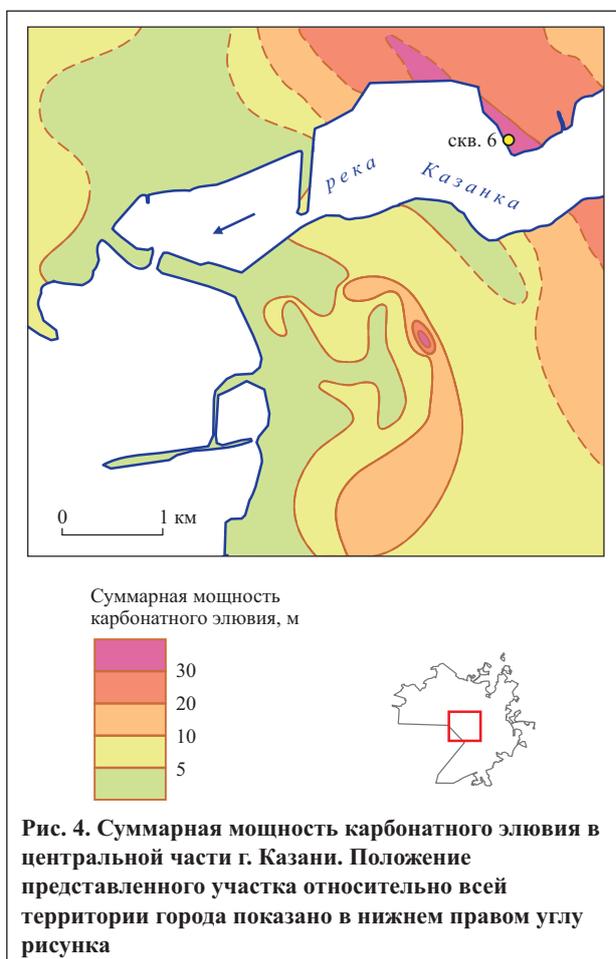
Подавляющая часть карбонатного элювия сосредоточена вблизи поверхности размыва. Тем не менее нередко наблюдается его залегание в виде прослоев и линз среди как невыветрелых карбонатных, так и терригенных пород различной степени разрушенности. Мощность таких элювиальных покровов, прослоев и линз изменяется в весьма широком диапазоне — от первых десятков сантиметров до 10–15 м (рис. 3).

Столь сложное залегание обусловлено:

- неравномерным чередованием карбонатных и терригенных пачек средней перми;
- первичной и вторичной неоднородностью минерального состава карбонатов (пятнистая доломитизация известняков и окремнение известняков/доломитов не способствуют их выветриванию);
- различными гидрогеохимическими условиями в прошлом и настоящем, что привело к разной степени выветрелости первоначально схожих по строению и составу пород.

Необходимо отметить, что иногда мощные неоднородные толщи карбонатного элювия по своей сути являются карстовой брекчией, сформировавшейся в результате обрушения кровли карстовых полостей в гипсах и доломитах нижней перми. Именно для такого типа элювия характерно присутствие глинистых минералов и кварца в минеральном составе пород.

Наиболее достоверно суммарную мощность карбонатного элювия можно оценить в центральной части города благодаря хорошей геологической изученности этого района и неглубокому залеганию исследуемых грунтов (на левом берегу р. Казанки на рис. 4). В целом, для исторического центра характерна толщина данных отложений до 5–10 м. Лишь в пределах вершин





останцов, где от размыва сохранилась более карбонатная средняя часть P<sub>2</sub>, можно наблюдать мощность более 10–15 м и в очень редких случаях более 30 м.

В пределах восточной области неглубокого залегания поверхности размыва мощность карбонатного элювия по данным единичных скважин оценивается также в диапазоне 2–5 м, реже 10 м.

Предположительно наибольшая суммарная мощность карбонатного элювия характерна для области развития неогенового вреза Пра-Волги. В единичных глубоких скважинах была зафиксирована его видимая мощность 40–70 м [7]. В частности, по данным скважины 6 на 70 м пермских отложений приходится 41 м выветрелых карбонатных пород (рис. 5).

Вышеуказанные особенности объясняются, во-первых, различными типом, интенсивностью и длительностью процессов выветривания на исследуемой территории. Так, 23 млн лет назад с началом миоцена (N<sub>1</sub>) на-

чался активный подъем востока Восточно-Европейской платформы (с амплитудой 200–300 м), что привело к формированию глубокой каньонобразной долины Пра-Волги [8]. В этот сравнительно холодный период в днище и на крутых склонах долины, вероятно, доминировало физическое выветривание. Затем, в течение плиоцена (N<sub>2</sub>, 5,3–2,6 млн лет назад) происходит заполнение долины аллювием и большая часть дезинтегрированных карбонатных пород на многие тысячелетия оказывается в зоне полного водонасыщения. Начиная с этого периода здесь доминирует химическое выветривание. В дальнейшем череда четвертичных похолоданий и потеплений, вызвавших колебания уровня мирового океана, привела к формированию серии аккумулятивных террас р. Волги и ее притоков. На данном этапе формируется преимущественно маломощный слой выветрелых пород, поскольку эти периоды были не столь длительными, а эрозионные врезы были не так велики, как в неогене.

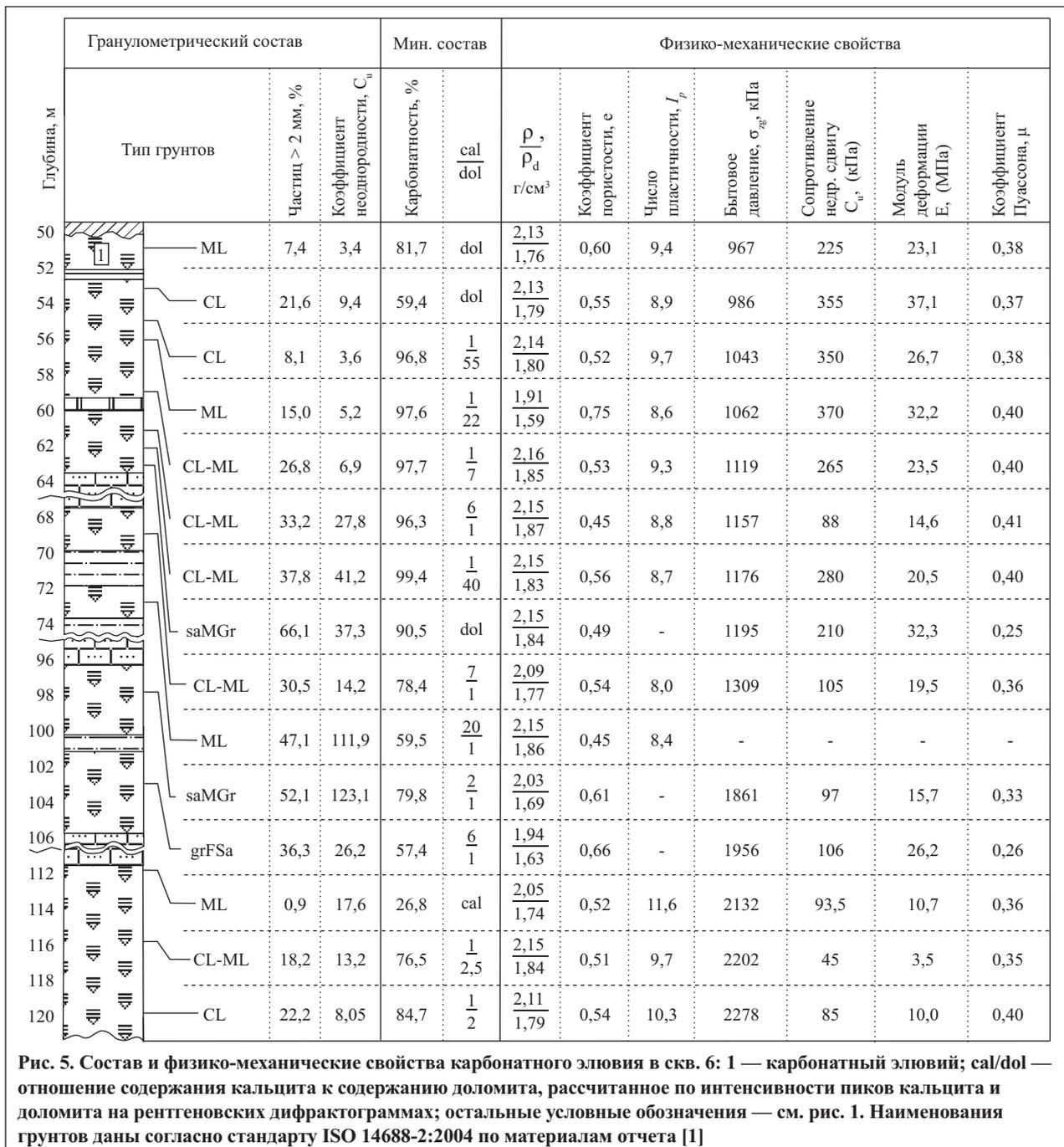


Рис. 5. Состав и физико-механические свойства карбонатного элювия в скв. 6: 1 — карбонатный элювий; cal/dol — отношение содержания кальцита к содержанию доломита, рассчитанное по интенсивности пиков кальцита и доломита на рентгеновских дифрактограммах; остальные условные обозначения — см. рис. 1. Наименования грунтов даны согласно стандарту ISO 14688-2:2004 по материалам отчета [1]



Рис. 6. Неоднородный состав карбонатного элювия (скв. 6, обр. 06–62, глуб. 62 м): а — песчано-гравийный материал; б — пылевато-песчаные зерна в этом материале; в — микрофотография SEM корродированного кристалла доломита на поверхности доломитового гравия

Во-вторых, существенную роль в разрушении карбонатных пород до дисперсного состояния играют подземные воды. Наиболее активному выщелачиванию и суффозионному разуплотнению подвергаются глубоко залегающие карбонатные породы, расположенные на крыльях плакантиклиналей и в тальвегах неогеновой палеодолины, где, вероятно, начиная с неогена осуществляется мощная разгрузка напорных сульфатных вод водоносной сакмарской карбонатно-сульфатной серии. В настоящее время благодаря антропогенному загрязнению грунтовых вод происходит активизация процессов выветривания на участках с неглубоким залеганием карбонатов, что приводит лишь к локальным увеличениям мощности выветрелых пород (см. рис. 4) [6].

Таким образом, большие мощности элювия вблизи погребенной неогеновой долины объясняются более длительным периодом дезинтеграции во время продолжительного эрозионного расчленения (в течение примерно 17 млн лет), а затем периодом химического выщелачивания и суффозионного разуплотнения (в течение примерно 5 млн лет).

### Состав, строение и физико-механические свойства карбонатного элювия

По гранулометрическому составу исследуемые отложения можно классифицировать как карбонатные супеси и суглинки с включениями обломков карбонат-

ных пород и как гравийно-щебнистый карбонатный грунт с заполнителем из карбонатного песка и пыли (см. рис. 5).

Основная масса карбонатного элювия представлена частицами 0,10–0,01 мм, практически нет частиц мельче 0,005 мм. Содержание дресвы и щебня карбонатных пород колеблется в диапазоне от 8 до 49% у карбонатных супесей и суглинков и от 50 до 70% у гравийно-щебнистых карбонатных грунтов. Во всех исследуемых отложениях супесчано-суглинистый заполнитель имеет близкие значения показателя пластичности  $I_p$  (от 8 до 10), что объясняется наличием карбонатной пыли (с размером частиц 0,10–0,01 мм) и отсутствием глинистого вещества. Именно частицы размером менее 0,01 мм отвечают за пластичность исследуемых грунтов. Кроме того, фильтрационные свойства исследуемых отложений очень близки между собой: их коэффициент фильтрации  $K_f$  находятся в диапазоне от  $0,2 \times 10^{-4}$  до  $0,6 \times 10^{-4}$  м/сут, что характеризует их как водонепроницаемые [5]. Последнее также объясняется сходством состава мелкой фракции.

Ранее многие исследователи неоднократно указывали на значительную неоднородность карбонатного элювия по гранулометрическому составу [6, 9]. Результаты исследований керна скважины 6 также подтверждают это предположение: коэффициент неоднородности  $C_u$  закономерно изменяется по разрезу от 3 до 123 (см. рис. 5). Обломки гравийной, песчаной и пылеватой фракций имеют угловатую форму (рис. 6, а, б), а самые мелкие обломки имеют размеры 0,001–0,002 мм и, по существу, являются отдельными зернами доломита, как правило, ромбоэдрической формы. Таким образом, исходная порода разрушается до отдельных зерен. Исследования по другим скважинам и обнажениям, выполненные авторами ранее на территории Казани (более 80 образцов), показали, что в карбонатном элювии как доломитового, так и доломит-известкового состава доломит концентрируется во фракции мельче 0,01 мм.

Распределение плотности сухого грунта ( $\rho_d$ ) и пористости ( $e$ ) с глубиной носит закономерно-незаконный характер (см. рис. 5). Более глубоко залегающие горизонты карбонатного элювия даже с большим содержанием гравийного материала имеют меньшую плотность, чем верхние горизонты. Такое разуплотнение может быть результатом суффозионного выноса и/или выщелачивания, происходящих под действием напорной разгрузки сульфатных вод водоносной сакмарской карбонатно-сульфатной серии. О процессах выщелачивания (происходящего, очевидно, в зоне насыщения) также свидетельствует коррозия поверхности как отдельных зерен, так и всей поверхности обломков доломита (рис. 6, в).

Наличие этих процессов подтверждается исследованием карбонатного элювия методом РКТ. Снимок, представленный на рис. 7, а, характеризует общую объемную пористость одного из образцов, на рис. 7, б — неоднородность строения грунта и пористость в произвольных сечениях. Поры часто образуют цепочки и каналы вокруг крупных обломков (см. рис. 7, б), что может являться результатом избирательной суффозии.

Большинство изученных авторами образцов карбонатного элювия при большом разнообразии гранулометрического состава имеют близкий минералогиче-

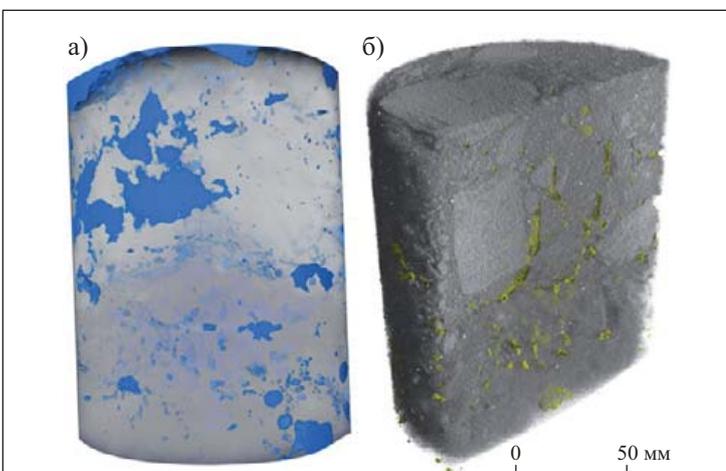


Рис. 7. Рентгеновские томографические снимки карбонатного элювия (скв. 6, глуб. 53 м): а — 3D-изображение общей пористости в монолите (синему цвету соответствуют пустоты); б — произвольные сечения (светло-серому цвету соответствуют обломки, желтому — пустоты)



ский состав. Они характеризуются, как правило, небольшой примесью кварц-полевошпатового обломочного материала и почти полным отсутствием глинистых минералов. Среди карбонатных минералов преобладает доломит в силу его большей устойчивости к выветриванию и распространения среди материнских пород [3].

Исследования, проведенные в лаборатории механики грунтов ИГиНГТ КФУ, показали, что при содержании дресвы и щебня карбонатных пород менее 50% изучаемые грунты при механическом нагружении деформируются и разрушаются как суглинки или супеси. Деформационные характеристики при этом в значительной степени зависят от процентного содержания и величины включений. Так, модули деформации, определенные по результатам трехосных испытаний, находятся в пределах 3–37 МПа, а коэффициенты Пуассона — в диапазоне от 0,35 до 0,41 (см. рис. 5).

В случае когда карбонатный элювий представляет собой гравийно-щебнистый грунт с заполнителем в виде муки, его необходимо испытывать как крупнообломочный грунт. В вышеуказанной лаборатории такие испытания проводились в установке трехосного сжатия для образцов диаметром 100 мм и высотой 200 мм. Размер частиц «максимальной» фракции при этом составлял одну пятую диаметра образца, т.е. 20 мм. В результате серии испытаний было установлено, что модули деформации таких грунтов находятся в пределах 16–32 МПа, коэффициенты Пуассона — в диапазоне 0,25–0,33 (см. рис. 5).

Влияние минерального состава на физико-механические свойства карбонатного элювия невелико. Отмечается лишь тенденция к уменьшению модуля деформации  $E$  с увеличением доли кальцита (см. рис. 5), объясняемая большей прочностью исходных микрочернистых доломитов по сравнению с исходными биогенными известняками.

### Геологические процессы, связанные с карбонатным элювием

Наличие карбонатного элювия в составе геологической среды предопределило развитие негативных гео-

логических и инженерно-геологических процессов на территории г. Казани.

1. На участках с пологим рельефом преимущественно на низких террасах в условиях близкого залегания грунтовых вод в результате неравномерного выщелачивания и дезинтеграции первично неоднородных материнских пород рядом исследователей зафиксированы оседания земной поверхности:

- локальные оседания диаметром несколько десятков метров и глубиной до 1 м в центральной части города выявлены на улицах Гоголя, Нужина, Баумана, Дзержинского, Астрономическая и Профсоюзная;
- более масштабные плавные оседания земной поверхности без разрыва сплошности с образованием крупных мульд размером в несколько сотен метров выявлены при повторном нивелировании в районах улиц Островского, Свердлова, Спартаковская, Ярмарочная и в районе Черного озера;
- общие нисходящие движения земной поверхности отмечены на значительной площади в центре города: максимальные скорости опускания наблюдаются у северного берега озера Нижний Кабан в районе улицы Островского и парка «Миллениум» (до 3–4 мм/год), вблизи северной части Кремлевского холма в районе улиц Ярмарочная и Ташаяк (4 мм/год и более), в районе Черного озера и улицы Дзержинского (до 3 мм/год) (они приурочены, по данным Нелидова, к наиболее высокой части эрозионного пермского останца в центральной части города [7]).

2. В пределах коренных склонов молодых эрозионных форм рельефа (речных долин, оврагов), вскрывающих карбонатную пермскую толщу, развиваются суффозионные и карстовые процессы, обусловленные, с одной стороны, высокой неоднородностью карбонатного элювия, с другой — высокими гидродинамическими градиентами и сезонными колебаниями уровня грунтовых вод в присклоновой части. Также локально отмечается выщелачивание (преимущественно кальцита) при наличии агрессивных вод по отношению к карбонатной части грунтов. В результате таких процессов формируются воронки (реже борозды) различной формы.

Значительное количество современных суффозионных и карстово-суффозионных форм приурочено к до-

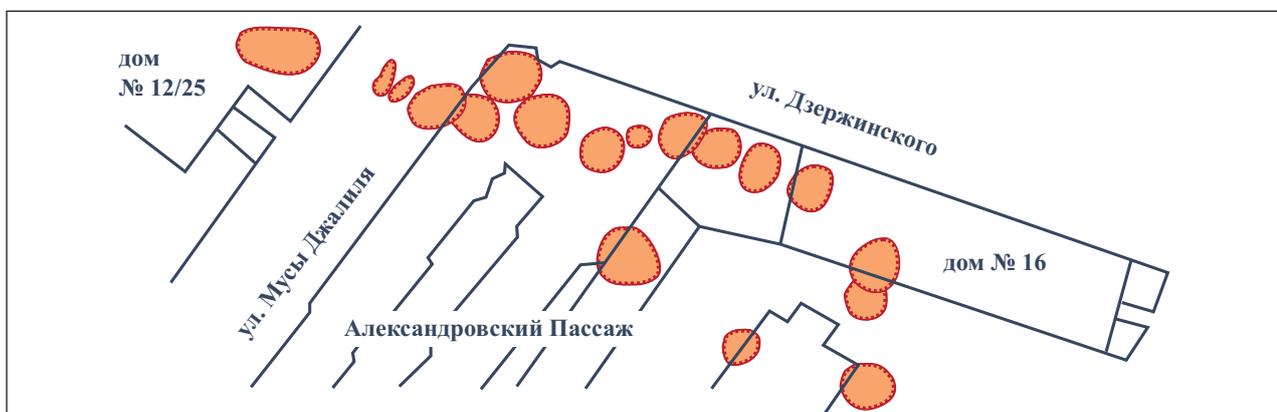


Рис. 8. Схема расположения карстово-суффозионных провалов под зданием Александровского пассажа в конце 70-х годов XX века (по данным ОАО «КазТИСИЗ»). Основная причина провалов: суффозионное и, возможно, химическое разуплотнение в толще карбонатного элювия из-за многолетнего техногенного подтопления. Диаметры воронок составляют 3–8 м, их глубина — 3–6 м. Поле воронок ориентировано вдоль склона Черноозерской впадины. Кровля карбонатного элювия залегает на глубине 8–10 м, его суммарная мощность составляет 13 м [2]



**Рис. 9.** Участок активного развития карстовых и суффозионных процессов в окрестностях п. Царицыно на северо-востоке г. Казани (апрель 2013 г., вид на запад). На переднем плане представлен свежий карстово-суффозионный провал размером в плане 6×10 м и глубиной 2,5 м, на заднем — глубокая карстовая котловина (100×120 м), борта которой осложнены многочисленными разновозрастными карстово-суффозионными воронками. Соответствующий инженерно-геологический разрез представлен на рис. 3, б

линам притоков реки Казанки (рек Киндерка, Нокса, Солонка), в меньшей степени они присутствуют в северо-восточной части Кремлевского холма (на склоне Черноозерской впадины) (рис. 8, 9). Диаметр воронок изменяется от 2 до 6 м (в среднем от 3 до 4 м), глубина — от 0,5 до 4 м (в среднем от 2 до 2,5 м). Их борта в верхней части крутые с хорошо выраженной бровкой, днище округлое и сухое. Следует отметить, что во всех указанных случаях плотность суффозионных и карстово-суффозионных форм возрастает в сторону бровок оврагов и речных склонов. Для некоторых участков характерна максимальная пораженность провальными формами — 1026 шт./км<sup>2</sup>, а следовательно, весьма высока степень суффозионной опасности.

### **Заключение**

Для территории г. Казани были получены новые данные по мощности и условиям залегания карбонатного элювия, относимого к особому типу грунтов, что позволило провести более детальное районирование

по положению в пространстве его толщ. Были детально изучены состав и свойства этих грунтов по керну одной из скважин (скв. 6). В том числе впервые для изучаемой территории были проведены трехосные испытания и оценены деформационно-прочностные свойства карбонатного элювия. По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Карбонатный элювий широко развит на территории г. Казани, залегает на глубинах от 15 до 120 м вдоль границ пермских карбонатов и неоген-четвертичных толщ, не выдержан по простиранию, имеет специфическое строение, состав, свойства и относится к особому типу грунтов.

Формирование данных отложений является результатом длительного выветривания, связано с геологической историей развития региона в неоген-четвертичное время, с образованием эрозионных врезов и разгрузкой напорных сульфатных вод в днищах долин и на крыльях плакантиклиналей.

Карбонатный элювий представлен в основном доломитовыми суглинками с различной долей гравия и щебня, крайне неоднороден, несет следы выщелачивания, обладает низкой пластичностью (имеет число пластичности  $I_p \approx 8 \div 12$ ), характеризуется преобладанием в тонких фракциях песчаных и пылеватых частиц диаметром 0,01–0,10 мм, почти полным отсутствием глинистого компонента и, как правило, высокой карбонатностью (57–99%).

Участки с неглубоким залеганием кровли карбонатного элювия (центральная часть города, пространственно связанная с пермским эрозионным останцом, и его северо-восточные окраины, приуроченные к долинам малых рек) характеризуются суффозионной и карстово-суффозионной опасностью.

Для оценки механических характеристик карбонатного элювия в лабораторных условиях оптимальным является метод трехосного сжатия, причем схема испытания должна выбираться в зависимости от процентного содержания обломков карбонатных пород, а размеры образцов — в зависимости от величины включений. При этом необходимо постоянно оценивать возможность получения монолитов высокого качества, пригодного для изготовления образцов ненарушенного сложения, и по возможности уточнять результаты лабораторных исследований по данным полевых испытаний.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анфимова С.В., Изотов Д.Н. и др. Отчет об инженерно-геологических изысканиях по объекту: «Коттеджный поселок в н.п. «Село Царицыно» Советского района г. Казани». Казань: Фонды ОАО «КазТИСИЗ», 2008. 47 с.
2. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия города Казани / под научн. ред. А.И. Шевелева. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2012. 236 с.
3. Горбачев Б.Ф., Васянов Г.П., Аблямитов П.О., Шишкин А.В. Влияние процессов гипергенеза на формирование, состав и свойства нерудного минерального сырья в Республике Татарстан // Георесурсы. 2007. № 4 (23). С. 28–33.
4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 82 с.
5. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с.
6. Жаркова Н.И., Даровских Н.Н., Галеев Р.К. Состав и свойства верхнепермского карбонатного элювия, как фактор формирования инженерно-геологических условий центральной части г. Казани // Вестник Татарстанского отделения Российской экологической академии. 2005. № 4. С. 22–25.
7. Малышева О.Н., Нелидов Н.Н., Соколов М.Н. Геология района г. Казани. Казань: Изд-во КГУ, 1965. 95 с.
8. Сладкопевцев С.А. Новейший этап развития речных долин. М.: Недра, 1977. 200 с.
9. Устинова Н.П., Рожкова Ф.А. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте «Первый участок первой линии метрополитена в г. Казани РТ». Казань: Фонды ОАО «КазТИСИЗ», 1998. 125 с.