

DOI 10.53278/2306-9139-2024-1-22-33-43
УДК 551.435.2

ЗОНАЛЬНОСТЬ ПРОФИЛЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ СРЕДНЕПЕРМСКИХ ПЕСЧАНИКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО ЗАКАМЬЯ

ZONALITY OF THE WEATHERING PROFILE OF MIDDLE PERMIAN SANDSTONES IN THE TERRITORY OF EASTERN ZAKAMYE

© 2024 г. А. И. Латыпов¹, А. Н. Гараева², Э. А. Королев³

© 2024 A. I. Latypov, A. N. Garaeva, E. A. Korolev

^{1,2,3} Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 4/5,
Казань, 420008, Россия

^{1,2,3} Kazan Federal University, bld. 4/5, Kremliovskaya st., Kazan, 420008, Russia

airatlat@mail.ru¹, anastya-solnce@mail.ru², edik.korolev@gmail.com³

Аннотация. Работа посвящена изучению основных закономерностей формирования элювиальных песчаников на территории Восточного Закамья — крупного промышленного региона в юго-восточной части Республики Татарстан. Для толщ среднепермских песчаников установлен зональный характер их строения, физико-механических свойств, химического и минерального состава в соответствии со степенью их гипергенного изменения. Получены сведения об элементном составе песчаников и его изменении в процессе выветривания. На основании систематизации и анализа полевых исследований построены региональные зависимости между параметрами статического зондирования и прочностными и деформационными характеристиками грунтов. Полученные результаты имеют важное практическое значение и позволят оптимизировать проектирование и строительство инфраструктуры и сооружений на данной территории.

Abstract. This work is about the study of the main patterns of formation of eluvium sandstones in the territory of the Eastern Zakamye. It is a large industrial region on southeastern part of the Republic of Tatarstan. For the thicknesses of the Middle Permian sandstones, the zonal character of their structure, physical and mechanical properties, chemical and mineral composition has been established in accordance with the degree of their hypergenic change. Information has been obtained on the elemental composition of sandstones and its changes during weathering. Based on the systematization and analysis of field studies, regional dependencies between the parameters of cone penetration test and the strength and deformation characteristics of soils are constructed. The results are of great practical importance and make it possible to optimize the design and construction of infrastructure in a given area.

Ключевые слова: кора выветривания, элювий, песчаник, песок, минеральный состав, химический состав, среднепермские отложения

Keywords: weathering crust, eluvium, sandstone, sand, mineral composition, chemical composition, middle Permian deposits.

Введение

Территория Восточного Закамья расположена в юго-восточной части Республики Татарстан южнее реки Кама и восточнее реки Шешмы (рис. 1) и представляет собой развитый регион с высокой антропогенной нагрузкой. На этой территории расположены такие крупные города, как Нижнекамск, Альметьевск, Бугульма, Бавлы, здесь разрабатываются крупнейшие месторождения нефти, например, Ромашкинское, Шугуровское,

Ново-Елховское, проектируются и возводятся крупные объекты нефтяной, химической и сельскохозяйственной промышленности.

Большая часть территории имеет сложные геологические условия из-за широкого распространения элювиальных грунтов, которые образовались в результате изменения исходных горных пород и их минералов в зоне гипергенеза.

Элювиальные грунты Восточного Закамья происходят от выветривания коренных оса-



Рис. 1. Расположение Восточно-Закамского региона в границах Республики Татарстан (показан штриховкой)

дочных пород казанского и уржумского ярусов пермской системы. Они не отображены на картах и не включены в стратиграфическую шкалу кайнозойской группы региона, что создает сложности при их диагностике как в процессе полевых, так и лабораторных работ. Элювиальные грунты быстро изменяют свои физико-механические свойства в плане и глубине, что делает их труднопредсказуемыми с точки зрения выбора проектных решений, а отсутствие единой методики выделения инженерно-геологических элементов в зависимости от степени выветрелости исходных пород ведет к серьезным трудностям при проведении инженерно-геологических исследований, что увеличивает сроки и стоимость проектирования и строительства.

Теоретический анализ

Активное развитие исследований элювиальных грунтов начало происходить с период с 1950 по 1980 годы, что было связано с рядом фундаментальных исследований Е. М. Сергеева [16], Н. В. Коломенского [10], К. И. Лукашева [13], Г. А. Голодковской [6], В. Д. Ломтадзе [12], Г. К. Бондарика [3], Л. А. Ярз [24], Е. Г. Чаповского [18], В. Т. Трофимова [17]. Основным выдвигаемым тезисом являлось то, что структура и состав элювиальных грунтов, а также их свойства, тесно связаны с геологическим строением территории. При этом толща коры выветривания разделялась на зоны с помощью различных схем, учитывающих множество факторов. Общим для всех исследователей являлось положение о том, что нарушение первичной сохранности связано с разуплотнением массива из-за искусственных и естественных причин, развитием трещиноватости, структурной дезинтеграции, выщелачивания. Для инженерно-геологической практики наиболее популярным было разделение профиля выветри-

вания на три зоны: А — разрушенные, сильновыветрелые и разуплотненные породы; Б — средне-сохранные, отчасти выветрелые и разуплотненные массивы с отдельными расширенными трещинами; В — относительно сохранные, слабовыветрелые массивы горных пород [23].

Дальнейшие работы Н. Н. Маслова [14], Г. С. Золотарева [7;8], В. Б. Швеца [21], В. Н. Широкова [23] имели большое значение в изучении физико-механических свойств элювиальных грунтов, а активное развитие методов математической статистики в этот период помогло выявить основные закономерности изменчивости свойств и состава грунтов для различных территорий.

Современные отечественные исследования связаны с решением прикладных инженерно-геологических задач, связанных с рациональным освоением некоторых ограниченных территорий, например, работы А. А. Сафроновой [15], Э. Р. Черныя [19], А. М. Коня [11], А. Г. Барановского [2], А. Н. Галкина [5], Д. М. Шестернева [22], Р. К. Илаовой и Ю. Л. Гульбина [9], С. А. Александрова и О. М. Гуман [1].

Зарубежные исследования кор выветривания начали активно развиваться начиная с 50-х годов XX века. Основное внимание уделялось поиску закономерностей в характеристиках выветривания в различных зонах и регионах, например, работы A. L. Little [29], P. G. Fookes [28], F. Derakhshan-Babaei, K. Nosrati и др. [24], N. Meyer, M. Kuhwald и др. [31].

Ряд авторов изучали закономерности формирования кор выветривания в различных климатических и геологических условиях, а также влияние состава пород на характеристики выветривания [32, 33]. Особое внимание уделялось пространственному распространению кор выветривания и составлению соответствующих карт. Работы первых лет XXI века отличает начало использования ГИС-технологий для подробного картирования распространения различных типов кор выветривания [34].

В современных исследованиях A. Dosseto, S. Turner и др. [27], J. Dixon, F. von Blankenburg [26] намечается тенденция оценки влияния антропогенных факторов и изменений климата на скорость выветривания горных пород и эволюцию кор выветривания.

Таким образом, за рубежом активно продолжается изучение кор выветривания с акцентом на региональные исследования, связанные с конкретными территориями, а также учетом практических аспектов инженерной геологии и геоэкологии. Эти направления исследований представляются важными для дальнейшего изучения кор выветри-

вания и связанных с ними элювиальных грунтов также в контексте российских условий.

Методика

Исследование основано на обширном фактическом материале, собранном в процессе полевых маршрутных наблюдений и лабораторных испытаний элювиальных грунтов территории Восточного Закамья. Схема расположения точек обследования показана на рисунке 2.

Физико-механические характеристики изучались в лаборатории механики грунтов кафедры общей геологии и гидрогеологии Казанского (Приволжского) федерального университета по общепринятым методикам. Минеральный состав элювиальных глин определялся методом рентгенографических исследований на дифрактометре D2 Phaser (Bruker). Микроструктурные характеристики были изучены на электронном микроскопе FEI XL-30ESEM. Исследования элементного состава проводились на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре S8 Tiger (Bruker), который позволяет определять элементный состав твердых, порошкообразных и жидких образцов в диапазоне от В до U в вакууме или атмосфере гелия.

Результаты и их обсуждение

Анализ строения измененных толщ песчаников по разрезу позволил выделить некоторую зональность и стадийность их постседиментационного преобразования под влиянием процессов гипергенеза (рис. 3).

В неизменном состоянии песчаники зоны сохранный массива (зона Г) обладают плотным сложением, по механическим свойствам соответствуют параметрам скальных грунтов. Согласно ГОСТ 25100-2020, песчаники сохранный массива классифицируются как грунты средней прочности и прочные с пределом прочности на одноосное сжатие 17,6–78,5 МПа, плотные (средняя плотность 2,1–2,4 г/см³), пористость 4,1–5,3%. Коэффициент выветрелости в большинстве случаев превышает значение 0,95. По минеральному составу породы относятся к граувакковым песчаникам, известковистым, слабо глинистым. Согласно данным рентгенографического анализа, породы сложены кварцем (32–34%), альбитом (24–26%), микроклином (12–15%), мусковитом (9–11%), кальцитом (15–18%), смешаннослойной иллит-монтмориллонитовой фазой (3–5%), хлоритом (2–3%), каолинитом (~1%) и гематитом (~1%). Кварц, альбит, микроклин и мусковит относятся к обломочной компоненте породы, кальцит — к цементирующему

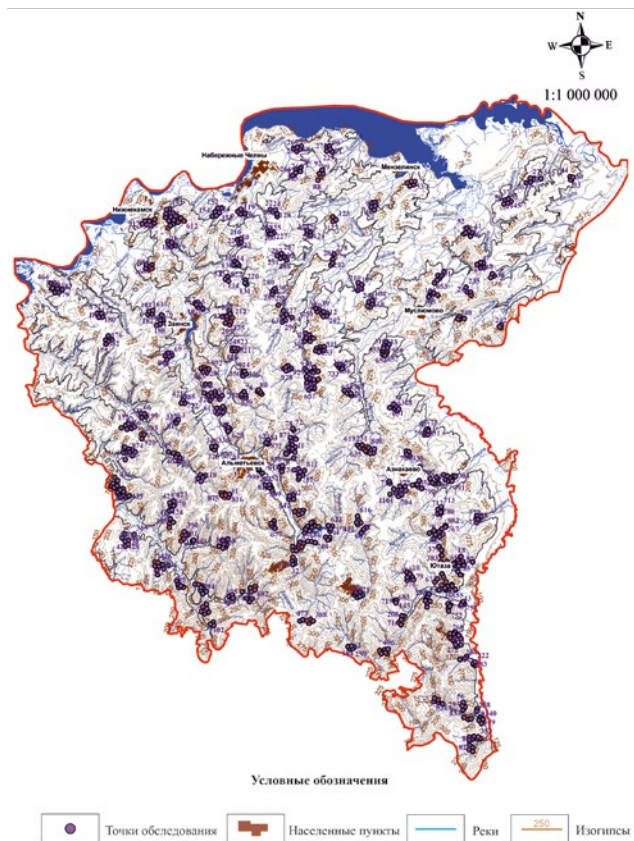


Рис. 2. Схема расположения точек обследования на исследуемой территории

веществу. Глинистые минералы представлены смешаннослойной иллит-монтмориллонитовой фазой, хлоритом и каолинитом. По результатам оптико-микроскопических исследований песчаник по структуре средне- и мелкозернистый, реже тонкозернистый, алевритистый, обладает косослоистой текстурой.

Порода на 80–85% сложена обломочной компонентой, на 15–20% — цементирующим минеральным веществом. Обломочная часть имеет размеры от 0,05 до 0,25 мм и представлена окатанными обломками кремнистых и эффузивных пород (70%), угловатыми зернами кварца (25%), чешуйками мусковита (5%). Обломки горных пород и минералов сцементированы кальцитовым цементом с примесью глинистого материала. Цемент базальнопорового типа, по структуре тонко-мелкозернистый за счет перекристаллизации. Пористость неизменных песчаников составляет 4–5%. Межзерновые поры субкапиллярной размерности выполнены водными растворами, препятствующими проникновению в породы внешних атмосферных вод. Подобные типы песчаников на большинстве участков слагают либо нижнюю неизмененную часть разрезов, либо образуют столбообразные релик-



Рис. 3. Зональность преобразования песчаников

товые останцы в гипергенно измененных массивах терригенных пород. С точки зрения строения профиля выветривания, они являются материнским субстратом, по которому развиваются элювиальные отложения (зона сохранного массива).

На неизмененных песчаниках залегает нечетко выраженная зона дезинтеграции профиля выветривания мощностью от 0,4 до 0,6 м (зона В). Она сложена многочисленными глыбами, щебнем и древесной из реликтовых фрагментов сцементированных исходных пород в окружении слабосцементированного, разуплотненного до рыхлого сложения песчаника. Обособленные куски реликтов по периферии несут следы выщелачивания и слабо скрепленные аллотигенные обломки горных пород и минералов. Снизу вверх по разрезу наблюдается последовательное уменьшение размеров реликтовых кусков песчаников, сопровождающееся повышением доли слабо сцементированной разрыхленной породы. Оптико-микроскопические исследования целиков зоны дезинтеграции показали, что в них прошел избирательный процесс выщелачивания. Обломки горных пород и минералов остались неизмененными, даже их положение в объеме породы не претерпело коррекций. При этом в локальных участках кальцитовый цемент был выщелочен с образованием пор-каверн размером до 1 мм. В ряде случаев кальцитовый цемент сохранился в виде оторочек по периферии обломочных зерен. Наблюдается тенденция сохранения большей толщины кальцитовой оторочки с увеличением содержания в них глинистого материала. Очевидно, что наличие в кальцитовом цементе глинистых минералов снижает

интенсивность его выщелачивания агрессивными инфильтрационными водами атмосферных осадков.

Лабораторные исследования образцов, отобранных из этой зоны, показали, что их предел прочности на одноосное сжатие несколько ниже чем в зоне Г и находится в интервале 13,2–46,3 МПа. Плотность изменяется в интервале 2,02–2,4 г/см³.

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

Необходимо отметить, что термин «элювированный песчаник» введен В. Н. Швановым [20] и характеризует состояние массива, при котором породы претерпели процессы химического или физического выветривания, но сохранили при этом текстурные признаки, свойственные исходной материнской породе.

Песчаники зоны Б сохранили первичную косослоистую текстуру, что не позволяет считать их классическим элювием. В пределах этой зоны из песчаников практически полностью выщелочен кальцитовый цемент. Его фрагменты отмечаются в локальных участках породы на контактах соприкасающихся зерен минерального скелета. В отличие от исходного песчаника, у которого обломки горных пород и минералов не соприкасаются между собой, а «плавают» в кальцитовом цементе, в зоне выщелачивания обломочные зерна контактируют друг с другом боковыми поверхностями. За счет постепенного сближения зерен у них сформировались точечные контакты с механическим типом

связи, чему в немалой степени способствовали шероховатость частиц кремнистых и эффузивных горных пород и угловатость кварцевых зерен. Одновременно с перемещением минеральных обломков произошло перераспределение глинистого материала. Инфильтрационные воды, смачивая глинистые минералы, способствовали их агрегированию и вторичной аккумуляции либо на контактах минеральных частиц, либо на шероховатых поверхностях обломков горных пород. Таким образом, в песчаниках сформировались, наряду с механическими, и коагуляционные типы связи. Глинистые агрегаты, обладая высокой сорбционной активностью, осаждали на поверхности из поровых растворов коллоидные соединения гидроксидов железа. Со временем, по мере «старения» коллоидов, гидроксиды преобразовались в гематит, увеличивая силу структурных связей между минеральными частицами в породе. Оптико-микроскопические исследования разуплотненных песчаников показали, что в пределах всего разреза породы характеризуются рыхлой структурной упаковкой. Минеральные частицы скелета взаимодействуют друг с другом через точечные контакты и мостики из глинистых агрегатов. За счет слабых структурных связей терригенные породы зоны выщелачивания легко разрушаются при механическом воздействии.

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

рая кальцит песчаников, уровень лежа грунтовых вод понижался, и процесс формирования рудного горизонта вновь начинался ниже по разрезу разуплотненных песчаников. Таким образом, в разрезе массива элювированных песчаников могло сформироваться до трех латерально выдержанных слоев, представленных разобщенными лимонитовыми конкрециями.

Процесс изменения структуры песчаников различных зон проиллюстрирован на рисунке 4.

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

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

Трудность отбора образцов ненарушенного сложения песчаников зоны Б при выполнении инженерно-геологических изысканий определяет возможность широкого использования полевых методов оценки прочностных и деформационных характеристик, в частности, метода статического зондирования как наиболее доступного и широко распространенного. При этом эффективность интерпретации полученных результатов существенным образом зависит от наличия корреляционных зависимостей между параметрами зондирования и значениями определяемых показателей свойств грунтов. При изучении элювированных песчаников были выполнены 180 точек статического зондирования на участках исследуемой территории, где мощность элювированных песчаников была достаточной для получения статистически обоснованных данных. Статистическая обработка результатов проводилась отдельно для тонко-, мелко- и среднезернистых песчаников, под которыми в данном контек-

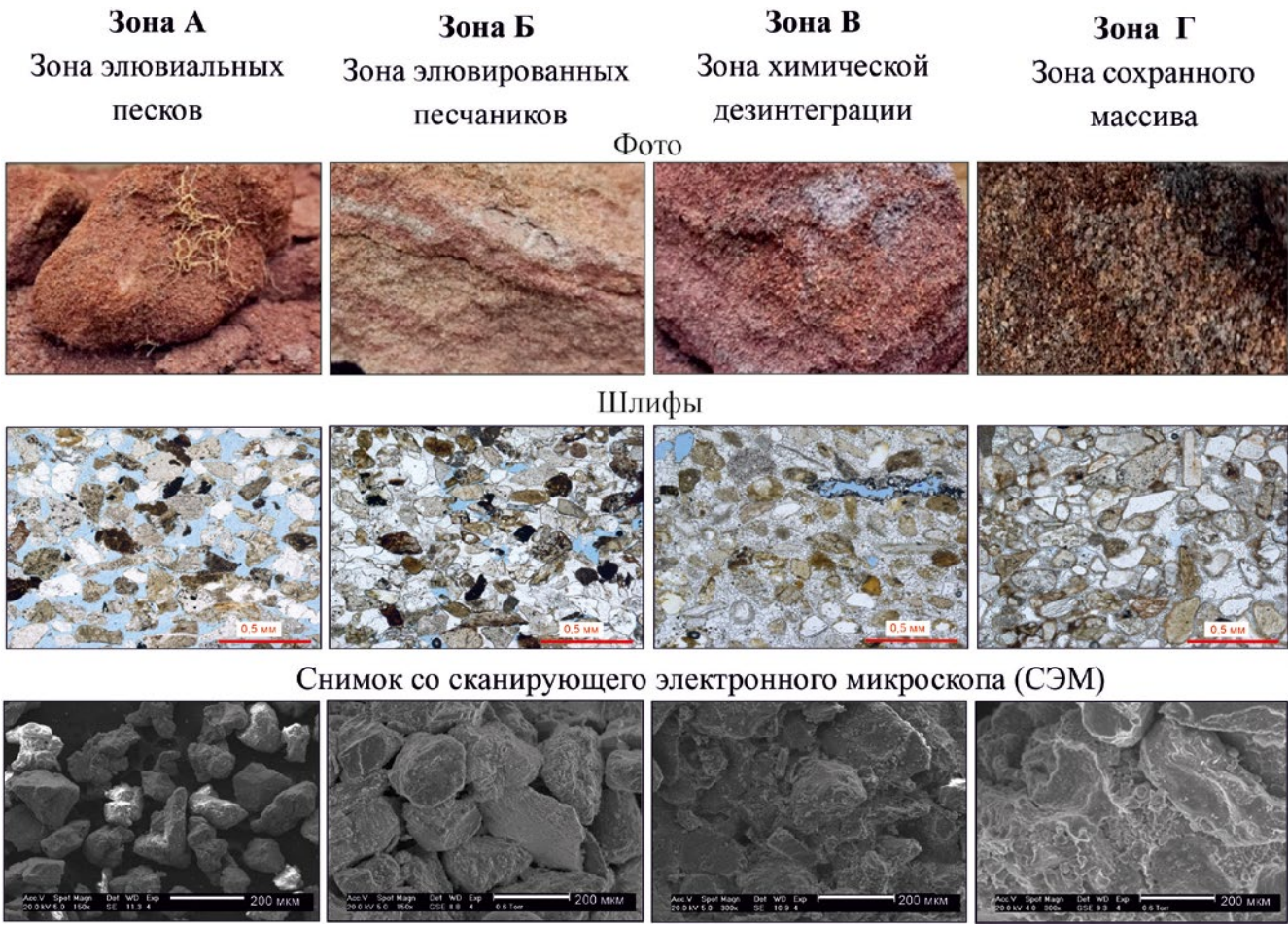


Рис. 4. Изменение структуры песчаников различных зон преобразования

сте понимаются песчаники, гранулометрический состав которых соответствует такой разновидности дисперсного грунта, как песок пылеватый, мелкий и средней крупности соответственно. При этом существенной разницы в основных определяемых характеристиках между песчаниками одного вида на различных участках территории Восточного Закарья и между песчаниками казанского и уржумского ярусов выявлено не было, поэтому обработка была выполнена без разделения по геоморфологической принадлежности и возрасту.

На основании анализа данных статического зондирования была разработана таблица определения плотности сложения песчаников различного гранулометрического состава в зависимости

от нормативных значений удельного сопротивления внедрению конуса q_c (табл. 1).

Сравнение с аналогичными по гранулометрическому составу дисперсными песками показывает смещение значений удельного сопротивления практически в каждой области в большую сторону. Наличие цемента в структуре песчаника, пусть и по большей части слабого, приводит к тому, что внедрение зонда в массив становится более сложным, что и находит отражение в увеличении значения удельного лобового сопротивления. При этом реальная плотность оказывается ниже, а деформативность выше ожидаемых. В этой связи особенно опасным с практической точки зрения является расчет несущей способности и осадок забивных

Таблица 1. Плотность сложения песчаников по данным статического зондирования

Песчаники	Плотность сложения при q_c , МПа		
	плотные	средней плотности	рыхлые
среднезернистые независимо от влажности	>16	7–16	<7
мелкозернистые независимо от влажности	>14	6–14	<6
тонкозернистые: неводонасыщенные	>12	4–12	<4
водонасыщенные	>10	3–10	<3

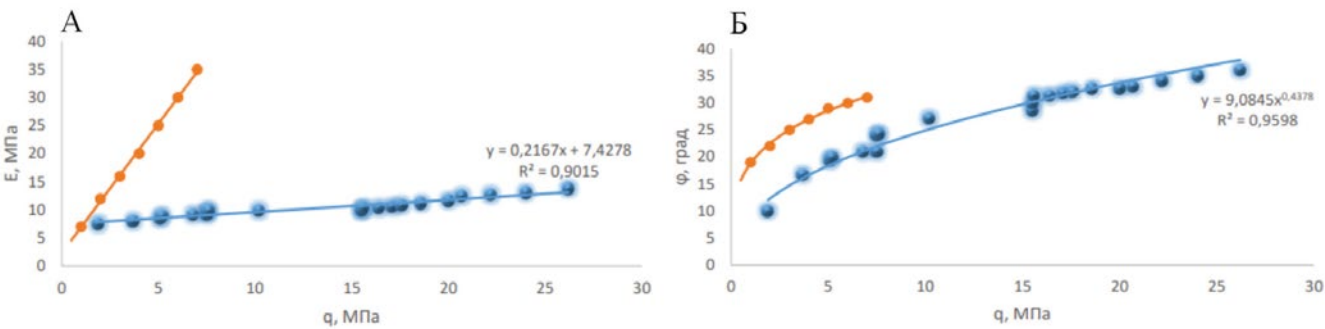


Рис. 5. Экспериментальные (синие линии) и нормативные (красные линии) зависимости модуля деформации E (А) и угла внутреннего трения (Б) от удельного лобового сопротивления зондированию q для тонкозернистого песчаника

свай по данным статического зондирования, т.к. в процессе забивки свай происходит разрушение цемента и, как следствие, значительно ухудшаются прочностные и деформационные свойства грунтового массива.

Вышесказанное иллюстрируется зависимостями модуля деформации и угла внутреннего трения от удельного лобового сопротивления зондированию (рис. 5).

Видно, что наиболее существенные расхождения с нормативными значениями наблюдаются между параметрами зондирования и деформационными характеристиками песчаников. Несмотря на наличие отдельных высоких значений удельного лобового сопротивления до 27 МПа, максимальное значение модуля деформации не превышает 18 МПа.

В таблицах 2, 3 и 4 приведены нормативные значения модуля деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления соответственно, определенные на основании статистической обработки 1762 точек статического зондирования.

Венчают разрезы массивов терригенных пород казанского яруса элювиальные пески, развивающиеся по кровле разуплотненных песчаников зоны выщелачивания. Мощность элювиального слоя, как правило, небольшая, варьирует от 0,2 до 0,6 м. Отсутствие более мощных элювиальных покровов объясняется постоянным сносом рыхлых песков в ближайшие понижения рельефа и речные долины. В отличие от подстилающих песчаников, пески характеризуются отсутствием первичной косослоистой текстуры, более плотным сложением, несколько большим содержанием глинистого мате-

Таблица 2. Нормативные значения модуля деформации для песчаников по данным статического зондирования

Вид грунта	Нормативный модуль деформации E _n при q _c , МПа													
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
среднезернистые независимо от влажности	12	15	18	19	21	22	23	25	25	26	28	30	–	–
мелкозернистые независимо от влажности	11	14	16	16	18	20	21	22	23	24	25	26	28	–
тонкозернистые: неводонасыщ. водонасыщ.	8 7	9 8	10 8	11 9	12 10	12 10	13 11	13 11	14 12	15 13	16 13	17 15	18 16	21 18

Таблица 3. Нормативные значения угла внутреннего трения для песчаников по данным статического зондирования

Вид грунта	Нормативный угол внутреннего трения φ _n при q _c град.									
	2	3	4	5	9	13	17	21	25	28
среднезернистые независимо от влажности	22	23	25	26	27	27	29	33	–	–
мелкозернистые независимо от влажности	21	23	23	24	25	26	28	30	32	–
тонкозернистые: неводонасыщенные водонасыщенные	17 16	20 18	22 21	23 21	25 23	26 24	27 25	27 26	29 27	30 29

Таблица 4. Нормативные значения удельного сцепления для песчаников по данным статического зондирования

Вид грунта	Нормативное удельное сцепление c_n при q_0 град.									
	2	3	4	5	9	13	17	21	25	28
среднезернистые независимо от влажности	14	17	20	25	28	30	33	35	–	–
мелкозернистые независимо от влажности	15	18	21	27	32	34	36	37	38	–
тонкозернистые: неводонасыщенные водонасыщенные	17 16	20 18	24 22	30 28	35 34	42 40	48 46	52 51	57 55	59 57

Таблица 5. Минералогический состав песчаников

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

Таблица 6. Результаты испытаний песчаников зоны сохранныго массива на морозостойкость после 30 циклов

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

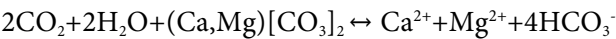
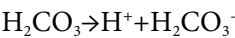
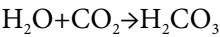
Зона \ Элемент		Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SrO (%)	MnO (%)
Зона элювиальных песков	Зона А	3,81	4,02	16,29	62,68	0,196	1,338	0,422	4,397	1,598	0,019	0,066
Зона элювированных песчаников	Зона Б	3,44	3,55	14,36	56,15	0,174	1,178	0,404	4,173	7,187	0,027	0,150
Зона химической дезинтеграции	Зона В	3,02	3,41	13,56	51,93	0,160	1,106	0,363	3,688	10,491	0,029	0,276
Зона сохранного массива	Зона Г	2,39	3,09	10,20	38,74	0,123	0,777	0,294	2,933	21,066	0,034	0,254

Рис. 6. Элементная зональность песчаников

риала, полным отсутствием кальцитового цемента. Находясь в зоне с контрастными перепадами температур и влажности, обломочные зерна приобрели более устойчивую структурную упаковку, приближенную к ромбоэдрической. Между обломками горных пород и минералов преобладают механические типы структурных связей. Глинистые минералы постоянно удаляются транзитными поверхностными водными потоками.

Процесс изменения структуры и минералогического состава песчаников различных зон проиллюстрирован в таблице 6 и на рисунке 6.

Как видно, процесс химического выветривания в песчаниках можно охарактеризовать протеканием процесса растворения карбонатов:



Таким образом, анализ стадийности изменений массивов песчаников показывает, что основным движущим процессом их гипергенного преобразования является выщелачивание кальцитового цемента. В результате этого первичные структурные связи цементационного типа сменяются более слабыми — коагуляционными и механическими. Особенностью процесса выветривания среднепермских песчаников является относительная сохранность положения минеральных частиц в объеме породного массива, неизменность их структурных и текстурных особенностей, приобретенных на стадии седиментации.

По существу, частично меняется лишь минеральный состав пород за счет удаления кальцита из их порового пространства. Конкурирующий процесс цементации минеральных частиц гидроксидами железа сказывается на увеличении сил сцепления в скелете песчаника и практически не отражается на других свойствах элювированных пород.

Влияние климатических факторов на дезинтеграцию песчаников оценивалось путем проведения испытаний образцов кубической формы размерами 50х50 мм на морозостойкость. Испытания проводились по базовому методу — замораживание образцов, предварительно насыщенных водой, и последующее их оттаивание в воде по следующему режиму: замораживание при температуре $-18 \pm 2^\circ C$ в течение 24 часов и последующее оттаивание при температуре $20 \pm 5^\circ C$ в течение не менее 2 часов. Разрушение образцов сопровождалось уменьшением их размеров, массы и соответственно плотности. Для исследования образцы отбирались на 16 различных участках территории Восточного Закамья (по пять образцов на каждом участке).

Для образцов песчаника, выдержавших многократные циклы замораживания и оттаивания, был определен коэффициент морозостойкости $K_{мрз}$ по формуле:

$$K_{мрз} = \frac{R_{мрз}}{R_c},$$

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

Выполненное исследование показало, что песчаники зоны сохранного массива, за редким исключением, могут быть классифицированы как морозостойкие (коэффициенты морозостойкости 0,80–0,98). В таблице 6 в качестве примера приведены результаты испытаний образцов песчаников, отобранных в районе г. Альметьевск и г. Муслюмово.

Для образцов, не выдержавших испытание на морозостойкость, определялась потеря массы и, соответственно, величина уменьшения плотности. У таких образцов наблюдалось появление трещин, сколов и других дефектов. Доля таких образцов от общего количества составила 13,3% (12 образцов из общего количества 90 штук), что подтверждает тезис о том, что при гипергенном изменении песчаников преобладающими являются процессы химического выветривания.

Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что гипергенные преобразования песчаников территории Восточного Закамья обусловлены в основном процессами химического выветривания, а физическое выветривание под действием отрицательных температур имеет вторичное значение.

Основным движущим процессом гипергенного преобразования песчаников является выщелачива-

ние кальцитового цемента, в результате чего первичные структурные связи цементационного типа сменяются более слабыми — коагуляционными и механическими. В результате этого процесса в профиле выветривания песчаников сформировались следующие четыре отличные друг от друга в инженерно-геологическом отношении зоны: зона неизменных плотных песчаников, зона химической дезинтеграции, зона элювированных песчаников, зона элювиальных песков.

Оценка плотности сложения и определение параметров механической прочности элювированных песчаников с использованием метода статического зондирования может проводится только на основании региональных зависимостей и таблиц, построенных для каждого конкретного региона.

Изучение процессов выветривания песчаников с точки зрения описания инженерно-геологических особенностей территории Восточного Закамья становится важным для безопасности и устойчивого развития региона. Полученные данные и результаты исследований позволяют эффективно прогнозировать риски и разрабатывать меры по инженерной защите от неблагоприятных геологических процессов, а также оптимизировать проектирование и строительство инфраструктуры и сооружений на данной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С. А., Гуман О. М. Опыт изучения элювиальных глинистых грунтов уральского региона / Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации // Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. — М.: «Геомаркетинг», 2019. — с. 78–82.
2. Барановский А. Г. Отечественный и мировой опыт изучения скальных и дисперсных элювиальных глинистых грунтов для инженерно-геологических целей // Инженерные изыскания. — 2015. — № 12. — С. 34–41.
3. Бондарик Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. — М.: Недра, 1971. — С. 272.
4. Бондарик Г. К., Пендин В. В., Ярг Л. А. Инженерная геодинамика. — М: КДУ, 2007. — 440 с.
5. Галкин А. Н. Грунтовые толщи Беларуси // Литосфера. — 2016. — № 1. — С. 73–79.
6. Голодковская Г. А. О влиянии тектонических процессов на формирование инженерно-геологических свойств горных пород // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. — М.: Изд. МГУ, 1968. — С. 17–34.
7. Золотарев Г. С. Современные задачи инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания // Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. — М.: Изд. МГУ, 1971. — С. 4–25.
8. Золотарев Г. С. Инженерная геодинамика. — М.: Изд-во МГУ, 1983–328 с.
9. Илалова Р. К., Гульбин Ю. Л. Особенности химического состава и термометрия хлоритов остаточной коры выветривания Кольского массива (Северный Урал) // Юбилейный съезд РМО «200 лет РМО»: / Материалы конференции. — СПб.: Горный университет, 2017. — С. 226–228.
10. Коломенский Н. В. Инженерная геология. — М.: Госгеолиздат, 1951–1956. — Т. 1–2. — 320 с.
11. Конев А. М. Строение, состав и свойства латеритные коры выветривания региона Димбокро (Кот д'Ивуар) // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2012. — № 1. — С. 4–55.

12. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология: учебник для вузов. — Л.: Недра, 1970. — 527 с.
13. Лукашев К. И. Зональные геохимические типы коры выветривания на территории СССР. — Минск: БГУ, 1956. — 305 с.
14. Маслов Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов: учебник для вузов — М.: Высшая школа, 1982. — С. 511.
15. Сафронова А. А. Особенности образования карбонатной муки // Карстоведение XXI: теорет. и практич. значение. — Пермь, 2004. — С. 78–81.
16. Сергеев Е. М. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. акад. Е. М. Сергеева. — М.: Недра, 1986. — С. 254.
17. Трофимов В. Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. — М.: Изд-во МГУ, 1977. — 276 с.
18. Чаповский Е. Г. Инженерная геология (основы инженерно-геологического изучения горных пород). — М.: Высшая школа, 1975. — 296 с.
19. Черняк Э. Р. Будущее — за региональными таблицами нормативных и расчётных показателей физико-механических свойств грунтов // Инженерная геология. — 2011. — № 9. — С. 4–9.
20. Шванов В. Н. Песчаные породы и методы их изучения (распространение, структуры, тектуры). — Л.: Недра, 1969. — 248 с.
21. Швеиц В. Б. Элювиальные грунты как основания сооружений. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1993. — 224 с.
22. Шестернев Д. М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 3. — С. 350–360.
23. Широков В. Н. и др. Рекомендации по оценке просадочности элювиальных грунтов Челябинской области. — Челябинск: ЧПИ, 1989. — 23 с.
24. Ярг Л. А. Изменение физико-механических свойств пород при выветривании. — М.: Недра, 1974. — 144 с.
25. Derakhshan-Babaei F., Nosrati K., Tihomirov D., Chistl M., Sadough H., & Egli M. Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. *Geomorphology*. 363–2020. — 107235.
26. Dixon J., von Blankenburg F. Soils as pacemakers and limiters of global silicate weathering Les sols, des «pacemakers» et des «limiteurs» pour l'altération globale des silicates // *Comptes Rendus Geoscience*. — vol. 344 Iss.11–12. — 2012. — P. 597–609.
27. Dosseto A., Turner S., Chappel J. The evolution of weathering profiles through time: New insights from uranium-series isotopes // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2008. — P. 359–371.
28. Fookes P. G. The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purpose / *Geotechnique*. — vol. 25 Iss.2 1975. — P. 406–411.
29. Little A. L. The engineering classification of residual tropical soils. *Proc. Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City. — 1969. — 1. — P. 1–10
30. 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.
31. Meyer N., Kuhwald M., Petersen J., & Duttman R. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. *Catena*. — 199. — 2021. — 105084.
32. Migoñ P. Structural control in the evolution of granite landscape. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, 39. — 2004. — 1. — P. 19–32.
33. Ollier C. D. *Geomorphology: Weathering* Elsevier — New York, 1969. — 304 p. *Geomorphology Texts*, vol 2.
34. Taylor G., Eggleton R. A. *Regolith Geology and Geomorphology*. Chichester. — New York, 2001. — 375 p.
35. Xiaolidong M., Cohen J., Martin D., McLaughlin A., BradMurray N., Ward M., Flint J., & Heffernan B. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape. *Chemical Geology*. 527–2019. — 118774.
36. Yongsheng Cheng. Analysis on mineralization geological conditions of Danchi metallogenetic belt. Guanxi, China. *Procedia Environmental sciences*. 12–2012. — P. 978–983.