

MICROCOSM OF CLAYS

V. N. SOKOLOV

The peculiarities of mineral composition and microstructure of clays are considered in this article. The relationship between the microstructure and the properties of clays is described. The article gives historical examples of serious damage to structures that happens as a result of the neglect of composition and microstructure of clays.

В статье рассмотрены особенности минерального состава и микроструктуры глинистых пород. Описана взаимосвязь между микроструктурой и свойствами глинистых пород. Приведены исторические примеры, когда не учитывались особенности состава и структуры глин, что приводило к серьезным строительным авариям.

МИКРОМИР ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

В. Н. СОКОЛОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Люди повсеместно сталкиваются с очень распространенными и всем хорошо известными породами – глинами. Мы знаем, что эти породы, в сухую погоду твердые как камень, после дождя часто превращаются в пластичную красновато-бурую грязь, сильно затрудняющую передвижение, а после отжига в печи глинистая масса преобразуется в прочный кирпич или керамику.

Вследствие чрезвычайно широкого распространения на земной поверхности (по данным Л.Б. Рухина, глинистые породы составляют не менее 60% от общего объема осадочных пород земной коры), глины на протяжении всей истории человечества постоянно были в центре внимания строителей. И это прежде всего из-за весьма специфических свойств таких пород – резкого падения прочности при увлажнении, разжижения при динамических воздействиях, набухания при обводнении и усадки при высушивании. Подобные свойства глинистых пород часто бывают причиной серьезных аварий инженерных сооружений: прорыва и разрушения дамб и плотин, деформации, а иногда и полного разрушения жилых зданий, ухода воды из каналов.

Большой интерес представляют такие свойства глинистых пород, как их высокая адсорбционная способность, позволяющая проводить эффективную очистку разнообразных веществ. Глинистые породы также являются природными минеральными барьерами против распространения различных загрязнений. В чем же причина уникальных свойств глинистых пород?

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Использование традиционных геологических методов изучения горных пород, таких, как оптическая микроскопия, определение характерных констант минералов, составляющих породу (цвет, наличие спайности, твердость), и ряд других, для изучения глин, к сожалению, не дают хороших результатов. Если посмотреть на свежий излом глинистой породы через оптический микроскоп, то можно увидеть лишь сплошную бугристую поверхность, в которой различаются только отдельные относительно “крупные” структурные элементы, такие, как песчаные и пылеватые зерна, поры, трещинки с размерами более чем 0,005 мм. Все дело в том, что

глинистые породы сложены частицами глинистых минералов, имеющих очень маленький размер, не превышающий 0,1 – 1,0 мкм (1 мкм = 0,001 мм). Столь мелкие частицы нельзя увидеть в оптический микроскоп. Это связано с тем, что длина волны пучка света, используемого в таком микроскопе в качестве исследовательского зонда, обычно составляет 0,8 мкм, что соизмеримо, а иногда даже больше, чем размер исследуемой глинистой частицы. Поэтому довольно “длинные” световые волны могут и не заметить столь маленький объект.

Устройство просвечивающего электронного микроскопа

Частицы глинистых минералов увидели лишь после создания просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). В этом приборе в качестве исследовательского зонда вместо световых лучей используется тонкофокусированный пучок быстро летящих в вакууме электронов. Электроны разгоняются с помощью ускоряющего напряжения, измеряемого кило- и даже мегавольтами. В ПЭМ вместо стеклянных или кварцевых линз используются электромагнитные линзы – электромагнитные катушки с током. Длина волны электронов исследовательского пучка в ПЭМ в сотни тысяч раз короче световых волн. Это означает, что разрешающая способность ПЭМ (минимальное расстояние между двумя точками микрообъекта, на котором они еще видны в микроскопе раздельно) в такое же количество раз больше, чем у оптического микроскопа, и для современных приборов составляет 1,4 ангстрема (1 ангстрем = 10^{-10} м). Увеличение ПЭМ может достигать нескольких сотен тысяч, а иногда и миллионов раз.

Принцип работы ПЭМ аналогичен просвечивающему оптическому микроскопу, когда пучок электронов проходит через тонкие минеральные частицы. При этом электроны сильно рассеиваются и поглощаются веществом частиц, вследствие чего на экране конечного изображения, располагающемся под образцом, можно наблюдать теневое изображение микрообъекта [1].

Изучение минерального состава с помощью ПЭМ

Метод просвечивающей электронной микроскопии позволяет определять по форме глинистых частиц одну из главных характеристик глинистых пород – их минеральный состав и дает представление о размере частиц. Анализируя степень сохранности и правильность форм микрокристалликов глинистых частиц, исследователь может сделать вывод о генезисе (происхождении) глинистых пород и происходящих в них процессах. Таким образом, с помощью ПЭМ в начале 50-х годов ученые – кристаллографы и минералоги – смогли увидеть тончайшие частицы глинистых минералов. Как следует из

работ отечественных и зарубежных ученых Л. Паулинга (Pauling, 1930), В.Л. Брегга (1937), Р.Е. Грима (1959), Н.В. Белова (1961), Б.Б. Звягина (1964), Л.Г. Рекшинской (1966) и др., глинистые минералы относятся к слоистым и слоисто-ленточным силикатам алюминия, железа и магния. В природных условиях они встречаются в виде чрезвычайно маленьких микрокристаллов с размером от сотых долей до нескольких микрометров. Основным диагностическим признаком этих минералов-невидимок является их специфическая анизометричная форма [2]. В ПЭМ вы можете увидеть изометрично-или удлиненнопластинчатые частички гидрослюда (рис. 1а), шестигранные пластинки каолинита (рис. 1б), расплывчатые облакообразные микроагрегаты частиц монтмориллонита (рис. 1в), частицы-трубочки галлуазита (рис. 1г) и частицы-иголки палыгорскита (рис. 1д). Здесь показаны некоторые из основных типов глинистых минералов, имеющих очень важное промышленное значение. Так, гидрослюда, каолинит и галлуазит являются прекрасным сырьем для изготовления высококалассной керамики. Их также используют как минеральные наполнители при изготовлении бумаги, резиновых и парфюмерных изделий. Каолинит – ценнейшее сырье при производстве фарфора. Монтмориллонит обладает прекрасными адсорбционными свойствами и широко применяется для очистки нефтепродуктов, вина, сукна и шерсти. Во многих странах монтмориллонит использовали как отличное моющее средство и как высокоэффективное лекарство при отравлениях, так как он быстро очищает организм от токсичных веществ. В настоящее время монтмориллонитовые глины часто используют как природные минеральные барьеры против распространения техногенных загрязнений и в качестве среды для захоронения радиоактивных отходов. Палыгорскит служит для приготовления устойчивых буровых растворов, применяемых при бурении глубоких скважин.

Природа свойств глинистых пород

Замечательные свойства глинистых пород во многом определяются кристаллохимическими особенностями глинистых минералов и их высокой дисперсностью (то есть чрезвычайно малым размером частиц) [3]. Наиболее типичным примером особого кристаллохимического строения могут служить монтмориллонит и смешанослойные глинистые минералы, которые имеют раздвижную кристаллическую решетку. При гидратации этих минералов (при взаимодействии с водой) молекулы воды могут входить в промежутки между элементарными слоями кристаллической решетки и существенно раздвигать их. Глинистые минералы обладают высокой способностью к ионному обмену, то есть замене некоторых ионов на поверхности и в кристаллической решетке частиц на ионы, поступающие из раствора. Отмеченные особенности глинистых минералов,

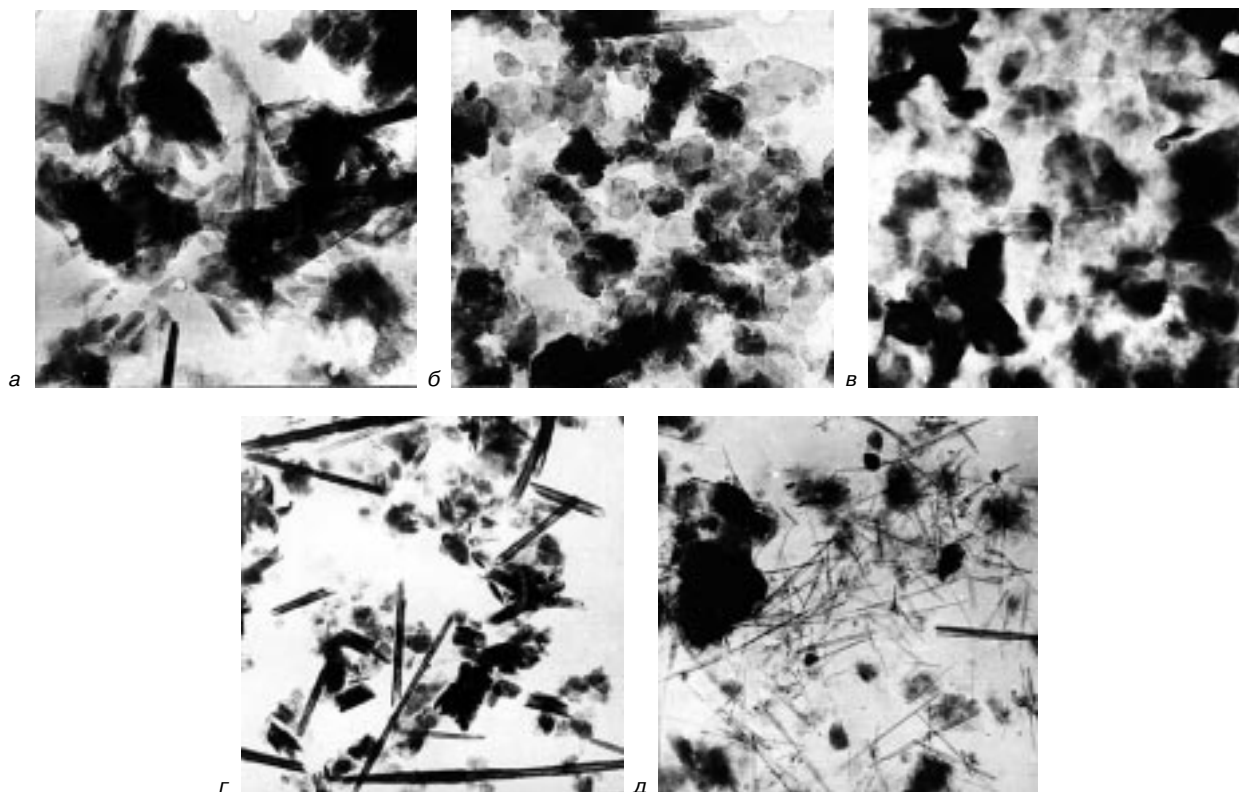


Рис. 1. ПЭМ-фотографии частиц глинистых минералов: а – гидрослюда; б – каолинит; в – монтмориллонит; г – галлуазит; д – палыгорскит; увеличение 10000х.

совместно с их высокой дисперсностью, а потому и чрезвычайно развитой поверхностью, обуславливают очень большую адсорбционную способность — способность активно поглощать из растворов различные вещества и химические элементы.

Важным также является то, что частицы глинистых минералов, находясь в воде, гидратируются (взаимодействуют с молекулами воды). При этом поверхность частиц обычно заряжается отрицательно и вокруг них притягиваются гидратированные противоионы. В результате этого процесса формируются так называемые двойные электрические слои (ДЭС). Иными словами, при взаимодействии с водой вокруг глинистых частиц образуются тонкие пленки воды, оказывающие колоссальное влияние на свойства глинистых пород.

Изучением поведения подобных тонкодисперсных минеральных систем занимаются такие науки, как грунтоведение, коллоидная химия, физико-химическая механика дисперсных систем. Можно привести фамилии всемирно известных ученых П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина, Е.М. Сергеева, Дж. Митчелла, Х. Ван-Олфена, которые работали над этими проблемами. В краткой статье мы, к сожалению, не можем подробно рассказать обо всех тонкостях их исследований. Отметим лишь, что

особое кристаллохимическое строение частиц глинистых минералов и их специфическое поведение при взаимодействии с водой в основном и определяют такие свойства глин, как пластичность, набухание при обводнении и усадка при высушивании, подвижность глинистых частиц в поле электрического тока (явление электрофореза) и возможность удаления порового раствора (осушение глины) при приложении постоянного электрического поля (явление электроосмоса). Оно объясняет многие катастрофические явления, такие, как оползни, сели, просадки и другие, связанные с аномальным прочностным и деформационным поведением глинистых пород (разжижение при динамических воздействиях, резкое падение прочности при увлажнении, выпирание глинистой породы под фундаментом при неравномерной нагрузке и др.).

МИКРОСТРУКТУРА ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Наряду с минеральным составом, исследование которого с помощью ПЭМ описано выше, другим важным фактором, определяющим многие свойства глинистых пород, является их микроструктура. Под микроструктурой будем понимать размер и форму глинистых частиц и микроагрегатов (совокупностей частиц), их взаимную ориентацию и тип

структурных связей (то есть сил, действующих на контактах между твердыми структурными элементами) [4]. Микроструктура глинистых пород очень чувствительна к изменению условий накопления минерального осадка и его последующих геологических преобразований. С точки зрения одного из основоположников отечественной инженерной геологии И.В. Попова, микроструктура отражает влияние различных физико-химических факторов на процессы структурообразования. Таким образом, микроструктура является своеобразной “фотографией” тех условий, в которых сформировалась данная глинистая порода. В ней за счет специфического сочетания различных морфометрических (размер, форма, характер поверхности структурных элементов, их количественное соотношение), геометрических (пространственное расположение структурных элементов) и энергетических (структурные связи) признаков как бы заложена информация о прочности и деформационном поведении породы, о возможном характере изменения под действием тех или иных условий. Таким образом, решая обратную задачу и количественно определяя соответствующие микроструктурные параметры, можно не только предсказывать многие свойства глинистых пород, но и дать достоверный прогноз их изменения при различных воздействиях. Подобная информация чрезвычайно важна при изысканиях и строительстве различных инженерных сооружений, при решении многих природоохранных и экологических задач.

Устройство и принцип действия растрового электронного микроскопа

К сожалению, до середины 50-х годов у исследователей не было достаточно надежного инструмента для изучения тончайшей структуры, то есть микроструктуры глинистых пород, так как световая оптика не обеспечивала требуемого разрешения, чтобы изучать морфологию глинистых частиц и их микроагрегатов, тип контактов между ними, характер порового пространства, ориентацию частиц в пространстве. Просвечивающий электронный микроскоп, хотя и дает высокое разрешение, обычно применяется для изучения кристаллографических особенностей глинистых частиц; с его помощью изучают отдельные твердые структурные элементы, специально извлеченные для этого из породы.

Принципиально новый этап в исследовании глинистых пород начался в конце 50-х годов, когда стали использовать растровую электронную микроскопию. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) построен аналогично ПЭМ, но в отличие от него имеет подвижный исследовательский зонд — тонко-сфокусированный пучок электронов. При этом используется телевизионный принцип развертки пучка в растр (в кадр). Отсюда и название — растровый электронный микроскоп. В англоязычных странах

используется другое название — сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), имея в виду, что пучок электронов сканирует, то есть пробегает по некоторому участку поверхности образца.

Процесс сканирования электронного зонда осуществляется с помощью специального устройства — отклоняющих катушек, на которые подается знакопеременный потенциал. На пути следования пучка имеются две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих катушек, которые осуществляют кадровую (вертикальную) и строчную (горизонтальную) развертки пучка. В отличие от ПЭМ с помощью РЭМ можно исследовать массивные (объемные) образцы.

В основе работы РЭМ лежит следующее физическое явление. При соударении электронного зонда с поверхностью массивного образца в его приповерхностной области формируется так называемая зона генерации сигналов, имеющая грушевидную форму [5]. При этом из зоны генерации начинается эмиссия различных сигналов, в том числе оже-электронов, вторичных электронов, отраженных электронов, характеристическое рентгеновское излучение и др. [5]. Каждый из этих сигналов несет определенную информацию о составе и строении образца. Например, с помощью характеристического рентгеновского излучения можно определить, из каких химических элементов состоит образец; оже-электроны позволяют узнать химический состав тончайшего (до 10 ангстрем) поверхностного покрытия и т.д. Ученых, изучающих микроструктуру образцов, больше всего интересует сигнал вторичных электронов. Дело в том, что этот сигнал, большая часть которого состоит из медленных электронов с энергиями до 50 эВ, несет в себе информацию о морфологии поверхности исследуемого образца. Энергия вторичных электронов пропорциональна углу наклона элементарной площадки на поверхности образца, из которой они вылетают. Собирая эти электроны и детектируя их по энергиям, можно получить изображение элементарной площадки в данной точке в виде пятна определенной яркости.

В РЭМ пучок электронов сканирует по поверхности образца, то есть дискретно построчно “обегает” всю исследуемую поверхность, выбивая в каждой точке вторичные электроны. Детектируя по энергиям суммарный сигнал вторичных электронов, можно воссоздать картину распределения элементарных площадок по всей поверхности образца в виде последовательности точек различной яркости.

Теперь рассмотрим процесс визуализации поверхности в РЭМ. Сигнал вторичных электронов регистрируется детектором и после усиления модулирует локальную яркость на экране телемонитора, развертка которого синхронна со смещением электронного зонда по поверхности образца. Таким образом, каждый элемент поверхности образца

находится во взаимно однозначном соответствии с яркостью определенного места на экране. Так как яркость элементарной площадки поверхности образца зависит от наклона относительно освещающего ее света (падающего пучка электронов) и так как РЭМ имеет очень большую глубину фокуса, то полутоновое изображение, возникающее на экране микроскопа, воспринимается глазом как объемное.

Увеличение прибора определяется соотношением амплитуд развертки луча по экрану микроскопа и на образце. Чем меньше амплитуда развертки зонда на образце, тем больше увеличение, и наоборот.

Типы микроструктур глинистых пород

Изучение в РЭМ образцов глинистых пород позволило ученым рассмотреть тончайшие детали строения с размерами менее 1 мкм. Исследователи увидели многие особенности микроструктуры, которые до этого были неизвестны. Работами В.И. Осипова и В.Н. Соколова [4, 6] было установлено, что среди большого многообразия глинистых пород можно выделить пять основных типов микроструктур — ячеистую, скелетную, матричную, турбулентную и ламинарную. При этом убедительно показано, что особенности микроструктуры глинистых пород тесно связаны со многими их свойствами. Рассмотрим подробнее эти микроструктуры.

Ячеистая микроструктура

В качестве примера породы с ячеистой микроструктурой возьмем образец современного морского глинистого осадка (глинистого ила), отобранного со дна Черного моря. На рис. 2 приведена его РЭМ-фотография. На этой фотографии зафиксирована микроструктура глинистой породы на самой начальной стадии формирования (на стадии седиментогенеза). Это типичная ячеистая микроструктура, образовавшаяся после коагуляции (от лат. *coagulatio* — затвердевание) и осаждения частиц глинистых минералов в морской воде. Ее главной морфологической особенностью является присутствие изометричных открытых ячеек. Стенки ячеек сложены листообразными микроагрегатами глинистых частиц, контактирующих между собой по типу плоскость — торец и торец — торец через водные пленки. Такие контакты называются коагуляционными. Их прочность невелика, так как она обусловлена слабыми дальнедействующими молекулярными и ионно-электростатическими силами. Характерной особенностью таких контактов является обратимое разрушение, то есть разрушение под нагрузкой и восстановление после ее снятия. Помимо однородной структурной сетки, в породах с ячеистой микроструктурой встречаются также и более крупные песчаные и пылеватые зерна, которые равномерно распределены по всему объему образца и не имеют непосредственных контактов друг с другом. Характерно присутствие значительного количества

различных органических остатков и обломков микрофауны.

Породы с ячеистой микроструктурой отличаются высокой пористостью (до 80%) и влажностью (до 300%). Естественно, что глинистые осадки со столь рыхлой микроструктурой обладают очень низкой прочностью и высокой сжимаемостью даже под очень малыми нагрузками. Они проявляют ярко выраженные тиксотропные свойства (греч. *thixis* — прикосновение, *trope* — поворот), то есть способность разжижаться даже при незначительных вибрациях и толчках, а в состоянии покоя восстанавливать свою структуру. Такое специфическое поведение молодых глинистых осадков и слабо уплотненных глин целиком определяется присутствием в них обратимых коагуляционных контактов, что уже отмечалось выше. При строительстве инженерных сооружений на подобных породах необходимо помнить об их коварных свойствах и принимать соответствующие меры по защите или упрочнению слабых пород основания.

В истории известен классический пример, когда присутствие слабых пород в основании сооружения не было учтено, — Пизанская башня в Италии, которая на протяжении последних 800 лет постепенно

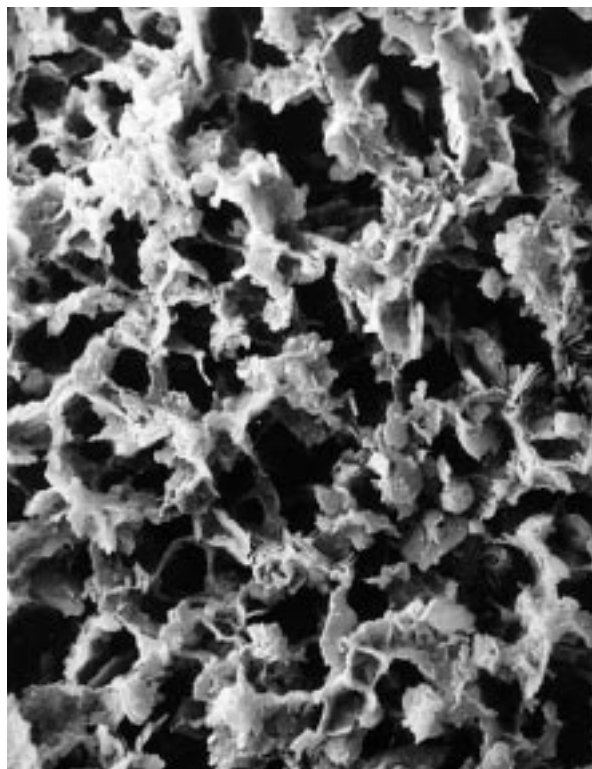


Рис. 2. РЭМ-фотография образца глинистого осадка (ила) со дна Черного моря с ячеистой микроструктурой; увеличение 2000х.

наклоняется и сейчас уже отклонилась от вертикали более чем на 4 м. В настоящее время южная часть фундамента башни ушла на 170 см глубже северной. По существу Пизанская башня является прекрасным памятником строительной ошибки. Дело в том, что под одной из сторон основания башни оказалась очень слабая водонасыщенная молодая глина, что и привело к неравномерной осадке фундамента, послужив причиной наклона. Необходимо сказать, что Пизанская башня является самым известным, но отнюдь не единственным примером подобных сооружений. Всего таких башен, в основании которых строители не учли присутствия слабых глинистых пород, более 40. Есть наклоненные башни и в России – в Таганроге, Казани и других местах. Широко известна дозорная башня в Невьяновске. При высоте 60 м она отклонилась от вертикальной оси на 2 м.

Скелетная микроструктура

В том случае, если в водных бассейнах накапливаются не глинистые, а песчано-пылевато-глинистые частицы, возможно формирование скелетной микроструктуры (рис. 3). Глинистые породы с такой микроструктурой сложены в основном зернами

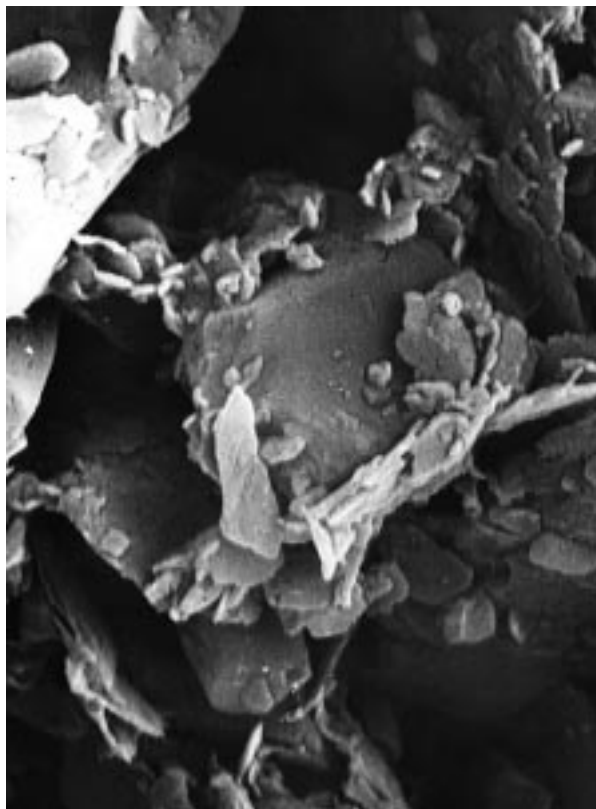


Рис. 3. РЭМ-фотография образца озерного суглинка со скелетной микроструктурой; увеличение 1500х.

первичных минералов, таких, как кварц, полевой шпат и другие, формирующих однородный “скелет”. Глинистый материал распределен неравномерно и не создает сплошной матрицы. Глинистые частицы обычно скапливаются на поверхности зерен в виде сплошных “рубашек” или на контактах песчаных и пылеватых зерен. Именно такая микроструктура показана на рис. 3. Здесь в центре РЭМ-фотографии отчетливо видна пылеватая кварцевая частица, покрытая глинистой рубашкой и контактирующая с другими частицами через тонкие цепочки глинистых частиц – глинистые мостики, которые по своей природе также являются коагуляционными контактами. Такая специфическая особенность скелетной микроструктуры служит причиной чрезвычайно низкой динамической устойчивости: в условиях полного водонасыщения, после воздействия даже довольно слабой вибрации, возможно разрушение глинистых мостиков, связывающих пылеватые зерна, и разжижение всей породы. В таких случаях говорят, что глинистая порода (обычно это суглинки и супеси) проявляет пльвунные свойства. Откосы, насыпи дорог, земляных плотин и дамб часто подвергаются подобным катастрофическим явлениям. Вдруг внезапно, а на самом деле после какого-то вибрационного воздействия, вызванного, например, прохождением транспорта или ударами волн, происходит обрушение откоса или оплывание насыпи, и они превращаются в кучу вязкой, жидкоподобной грязи. Читатели, вероятно, и по своему жизненному опыту знают, как тяжело бороться с пльвунными породами при выкапывании траншей и котлованов. В данной ситуации надо быть предельно внимательными и использовать при строительстве специальные приспособления, например, устанавливать опережающую опалубку. Метростроевцы часто борются с пльвунами при проходке тоннелей с помощью заморозки этих участков.

Матричная микроструктура

В ходе геологического развития, когда молодые глинистые осадки погружаются в более глубокие горизонты земной коры и уплотняются, происходят существенные изменения в микроструктуре глинистых пород. Так, например, морской ил с текуче-пластичной консистенцией трансформируется в более плотную пластичную глину с матричной микроструктурой (рис. 4). Она характеризуется присутствием сплошной неориентированной глинистой массы (матрицы), в которой содержатся беспорядочно расположенные пылеватые и песчаные зерна, не контактирующие между собой. Как правило, глинистые породы с матричной микроструктурой (например, ледниковые отложения – плотные моренные суглинки), имеют достаточную прочность и не вызывают каких-либо проблем у строителей.

Турбулентная и ламинарная микроструктуры

Если глинистые породы попадают на большие глубины, где подвергаются воздействию высокого

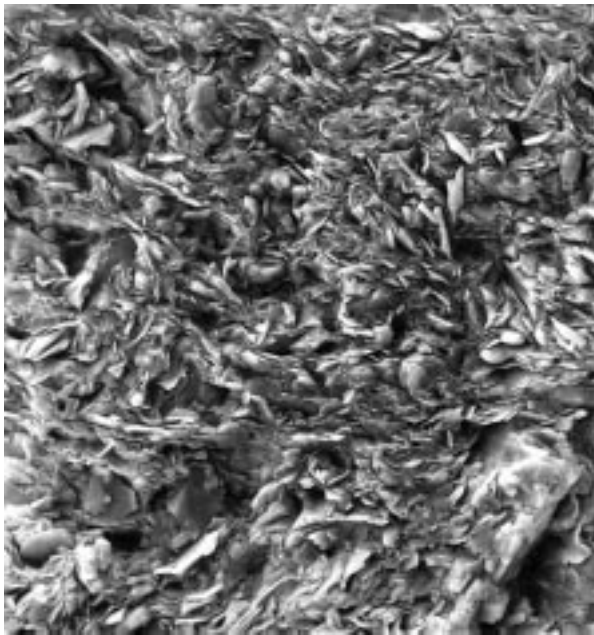


Рис. 4. РЭМ-фотография образца морской глины с матричной микроструктурой; увеличение 1000х.

уплотняющего давления и температуры, то начинается интенсивная перестройка микроструктуры, заключающаяся прежде всего в переориентации глинистых частиц в направлении, перпендикулярном прикладываемой нагрузке. Как правило, в результате этого процесса частицы и микроагрегаты в породе уплощаются, существенно сближаются друг с другом и приобретают высокую степень ориентации [7]. На рис. 5 и 6 показаны примеры таких высокоориентированных микроструктур – турбулентной (рис. 5) и ламинарной (рис. 6). Свое название эти микроструктуры получили из-за удивительного сходства расположения листообразных микроагрегатов глинистых частиц с картиной течения жидкости в турбулентном (с завихрениями) и ламинарном (прямолинейном) потоках. Как правило, глинистые породы с такой микроструктурой очень плотные и прочные. Пористость таких пород обычно не превышает 20%, а их прочность может составлять сотни и даже тысячи килограммов на 1 см². Столь высокая прочность у пород с турбулентной и ламинарной микроструктурами обусловлена присутствием в них очень прочных фазовых контактов кристаллизационной или цементационной природы. Иными словами, находясь в условиях высоких давлений и температур, а также подвергаясь воздействию различных химических растворов, отдельные минеральные частицы как бы свариваются друг с другом по контактирующим внешним поверхностям или цементируются различными химическими веществами (карбонатами, железом и т.д.). Прочность

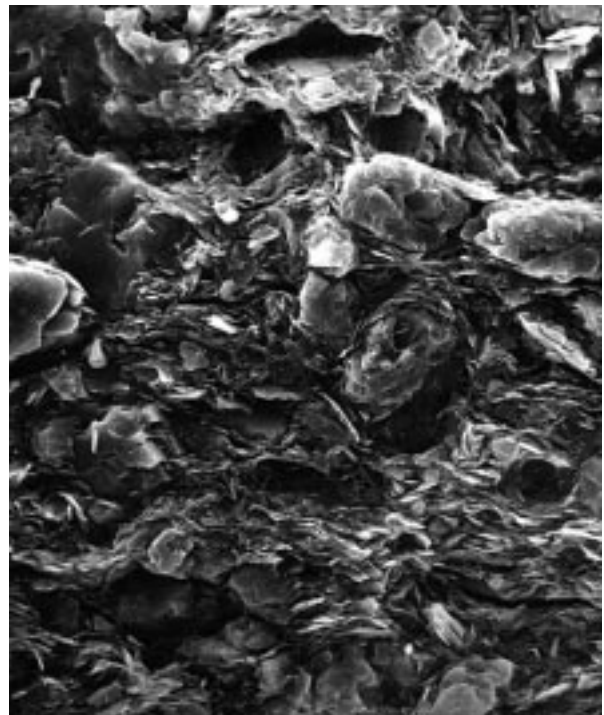


Рис. 5. РЭМ-фотография образца синей кембрийской глины с турбулентной микроструктурой; увеличение 1000х.

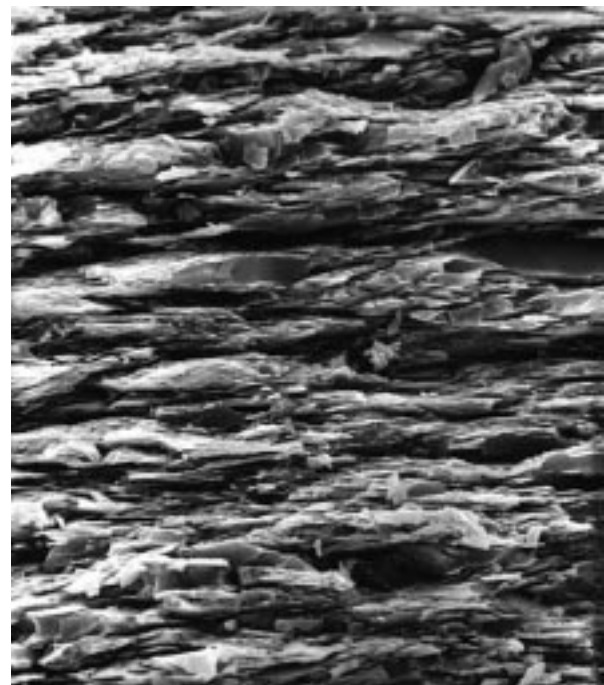


Рис. 6. РЭМ-фотография образца глинистого сланца с ламинарной микроструктурой; увеличение 1000х.

таких пород становится соизмеримой с прочностью самих минералов.

Казалось бы, такие породы являются наилучшим основанием для строительства – прочным и несжимаемым. Однако это не совсем так. Во-первых, присутствие высокой ориентации частиц по напластованию часто приводит к расслаиванию породы, в результате чего в сильно уплотненных глинах, аргиллитах, глинистых сланцах существует большая анизотропия свойств, то есть прочность перпендикулярно микрослоям может быть во много раз выше, чем вдоль слоев. Безусловно, это надо знать строителям и учитывать в расчетах анизотропию прочности. Ведь в случае наклонного залегания таких пород в основании какого-нибудь тяжелого сооружения, например высотной арочной плотины, перегораживающей в горах узкое и глубокое ущелье, возникающие тангенциальные (боковые) напряжения могут оказаться во много раз большими, чем прочность вдоль микрослоистости. В этом случае может произойти разрушение основания плотины, что повлечет за собой страшную катастрофу. Во-вторых, несмотря на высокую прочность и твердость в сухом состоянии, высокоуплотненные глины, аргиллиты и сланцы при длительном взаимодействии с водой могут существенно терять свою прочность в связи с возникновением эффекта расклинивающего действия воды (эффект Ребиндера). Суть этого явления заключается в том, что молекулы воды, проникая в узкие зазоры и щели, а именно такую форму имеют промежутки (микропоры и микротрещины) между параллельно ориентированными глинистыми частицами и микроагрегатами, интенсивно раздвигают стенки (то есть частицы), в результате чего химические связи (фазовые контакты) существенно ослабляются. Например, глинистые сланцы могут многократно терять свою прочность от нескольких тысяч до нескольких сотен килограммов на 1 см². Этот процесс усугубляется, если вода имеет повышенную агрессивность (например, повышенную кислотность) и при ее фильтрации через породу происходит растворение и размягчение связей, увеличение пористости и интенсивный вынос вещества породы.

Если не учитывать подобные особенности таких, казалось бы, прочных и вечных пород, это может привести к тяжелейшим последствиям. История строительства содержит множество описаний тяжелых аварий плотин. Например, катастрофа Бейсейской плотины в Вогезах (Франция) унесла 150 жизней, когда вырвавшийся водный поток полностью уничтожил четыре населенных пункта. Причиной аварии была ошибочная оценка свойств глины, находившейся в основании сооружения. В результате под действием воды глинистые породы размягчились, потеряли прочность и плотина сползла вниз по уклону речной долины. Бетонная плотина на реке Аустина в штате Пенсильвания (США) просто рухнула. В результате погибло 100 человек. Было ус-

тановлено, что главной причиной катастрофы стала неверная оценка размягчения глинистых сланцев и водопроницаемости других пород основания.

Самая крупная катастрофа в Европе после второй мировой войны связана с разрушением плотины Мальпассе. Плотина была возведена в Провансе (Франция) вблизи города Фрежюсон. Высота плотины 66,5 м. Катастрофа произошла в 1959 году после сильных дождей. Ночью плотина сместилась, и сильнейший напор воды разорвал ее. Многотонные обломки плотины были перенесены водой на сотни метров вниз по долине реки. Образовавшийся поток обрушился на селения и небольшой город. В результате погибло более тысячи жителей. Как показали последующие исследования, причина катастрофы заключалась в том, что не были учтены сланцеватость (высокая степень ориентированности глинистых частиц) и сильная трещиноватость (включая микротрещиноватость) глинистых пород, на которых была построена плотина. После интенсивного промачивания дождем эти породы существенно снизили прочность и не смогли выдержать нагрузку от веса плотины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного можно сделать вывод, что знание и учет особенностей минерального состава и микроструктуры глинистых пород, а также понимание сложных природных процессов, влияющих на свойства глин, являются непременным условием при проектировании инженерных сооружений, возводимых на этих специфических породах. Необходимо помнить, что неверная оценка их особенностей может привести к непредсказуемому поведению глинистых пород и вызвать катастрофические последствия.

В данной статье читатели по-новому увидели глинистые породы, повсеместно встречающиеся в природе. Чрезвычайно интересен и удивителен микромир этих пород, состоящих из тончайших частиц глинистых минералов. Познание закономерностей этого мира поможет более целенаправленно и рационально использовать имеющиеся ресурсы земной коры и избежать многих негативных явлений, связанных со строительством различных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сергеева Н.Е.* Введение в электронную микроскопию минералов. М.: Изд-во МГУ, 1977. 144 с.
2. *Рекшинская Л.Г.* Атлас электронных микрофотографий глинистых минералов. М.: Недра, 1966. 230 с.
3. *Грунтоведение / Под ред. акад. Е.М. Сергеева.* М.: Изд-во МГУ, 1983. 389 с.
4. *Осинов В.И., Соколов В.Н., Румянцев Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.

5. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. М.: Мир, 1978. 656 с.

6. *Грабовска-Ольшевска Б., Осипов В.И., Соколов В.Н.* Атлас микроструктур глинистых пород. Варшава: Наука, 1984. 411 с.

7. *Соколов В.Н.* Формирование микроструктуры глинистых грунтов в ходе прогрессивного литогенеза. Инженерная геология: теория, практика, проблемы. Сб. науч. тр. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 26 – 41.

* * *

Вячеслав Николаевич Соколов, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной геологии и охраны геологической среды Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор 197 научных работ, 9 авторских свидетельств и 5 зарубежных патентов. Основные направления научных исследований – физико-химическая механика дисперсных грунтов, изучение микроструктуры горных пород.