

ГЛИНИСТЫЕ ПОРОДЫ И ИХ СВОЙСТВА

В. Н. СОКОЛОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

CLAYS AND THEIR PROPERTIES

V. N. SOKOLOV

The problems of clay properties formation are considered. The main factors affecting the properties – mineral composition and structure – are described. An approach which has been developed in the physical-chemical mechanics of the dispersed porous structures can be successfully applied to the study of the strength behavior of clays. Examples and an explanation of the most important properties of clays are given.

Рассмотрены вопросы формирования свойств глинистых пород. Описаны главные факторы, влияющие на свойства глин, – минеральный состав и структура. Показано, что для изучения прочностного поведения глинистых пород можно успешно применять подход, разработанный в физико-химической механике дисперсных пористых структур. Приведены примеры и дано объяснение наиболее важных свойств глин.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Глины являются одним из наиболее распространенных типов горных пород, слагающих до 11% всего объема земной коры. С ними часто приходится иметь дело при возведении фундаментов зданий и строительстве различных инженерных сооружений. Они повсеместно используются как сырье для производства керамики, кирпича, цемента, а также в качестве наполнителя при изготовлении резины, бумаги, буровых растворов и т.д. Глины обладают высокой адсорбционной способностью, и их успешно применяют для очистки масел, красок, вина, отбеливания тканей, а также как естественные экологические барьеры для борьбы с распространением техногенных загрязнений.

Несмотря на столь широкое использование глин и длительный опыт строительства на них, все еще существует много вопросов, связанных с особенностями поведения глинистых пород. Об этом наглядно свидетельствуют многочисленные деформации различных инженерных сооружений, происходящие в результате уплотнения, набухания, усадки, разжижения и размокания глинистых пород в их основаниях. По данным Геологической службы США, прямые и косвенные убытки, причиняемые этими негативными явлениями в различных государствах мира, достигают сотен миллиардов долларов и соизмеримы с потерями от крупных катастрофических явлений (землетрясений и наводнений).

Какова же природа свойств глинистых пород и чем объясняются столь специфические особенности их поведения?

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Минеральный состав

Глины образованы чрезвычайно мелкими по размеру микрокристаллами глинистых минералов, которые во многом определяют свойства этих пород. Глинистые минералы относятся к группе слоистых и слоисто-ленточных силикатов. Высокая дисперсность глинистых

минералов является их естественным физическим состоянием. Обычно размер микрокристаллов этих минералов в глинах не превышает нескольких микрон. Частицы глинистых минералов имеют преимущественно пластинчатую форму, однако встречаются также частицы в виде полосок, трубочек, иголочек [4].

Высокая физико-химическая активность глинистых минералов обусловлена не только малым размером, но и особенностями их кристаллического строения. В основе кристаллической структуры глинистых минералов лежит контакт тетраэдрических и октаэдрических элементов. Первый элемент образован кремнекислородными тетраэдрами, состоящими из атома кремния и четырех окружающих его атомов кислорода. Отдельные тетраэдры, соединяясь друг с другом, создают непрерывную двухмерную тетраэдрическую сетку.

Другим структурным элементом глинистых минералов является октаэдр, образованный шестью атомами кислорода или гидроксильными группами. В центре октаэдра может располагаться атом алюминия, железа или магния. Отдельные октаэдры, соединяясь, образуют двухмерную октаэдрическую сетку. Благодаря близости размеров тетраэдрические и октаэдрические сетки легко совмещаются друг с другом с образованием единого гетерогенного слоя. Связь между гетерогенными слоями у глинистых минералов может быть различной в зависимости от особенностей строения слоя и его заряда. У некоторых глинистых минералов она достаточно прочна и обеспечивается взаимодействием атомов кислорода и гидроксильных групп (водородная связь) или катионами, располагающимися в межслоевом пространстве (ионно-электростатическая связь). У других минералов связь между слоями менее прочная и обусловлена молекулярными силами.

В первом случае глинистые минералы имеют более жесткую кристаллическую структуру, то есть такую, когда молекулы воды и обменные катионы не могут проникать в межслоевое пространство кристалла. У минералов с жесткой кристаллической структурой (каолинит, гидрослюда, хлорит, палыгорскит) внутрикристаллическое набухание (расширение межслоевого расстояния при взаимодействии с молекулами воды) отсутствует. Во втором случае глинистые минералы (монтмориллонит, нонтронит) имеют раздвижную кристаллическую структуру. При гидратации таких минералов молекулы воды и обменные катионы могут проникать в межслоевое пространство и существенно увеличивать межслоевое расстояние, обуславливая этим большое внутрикристаллическое набухание.

Помимо описанных глинистых минералов в природе также широко распространены так называемые смешанослойные минералы, образующиеся в результате упорядоченного или неупорядоченного чередования

набухающих и ненабухающих структурных слоев (монтмориллонит–гидрослюда, монтмориллонит–хлорит). По своим свойствам смешанослойные глинистые минералы занимают промежуточное положение между минералами с жесткой и раздвижной кристаллическими структурами.

Глинистые минералы обладают ярко выраженными ионно-обменными свойствами, что совместно с малым размером частиц и высокой удельной поверхностью (суммарной площадью поверхности частиц в единице массы породы) определяет их повышенную адсорбционную способность. Это замечательное свойство позволяет использовать глины как природные высокоэффективные сорбенты для защиты почв, грунтов и подземных вод от техногенных загрязнений.

Чрезвычайно важным моментом при взаимодействии частиц глинистых минералов с водой является формирование вокруг их поверхности двойного электрического слоя (ДЭС) [1, 2]. Внутренняя часть ДЭС образована отрицательно заряженной поверхностью глинистой частицы, а внешняя состоит из адсорбционного и диффузного слоев гидратированных катионов. Структура ДЭС во многом зависит от pH и концентрации солей раствора, в котором он формируется. Из-за кристаллохимических особенностей строения глинистых минералов при изменении pH раствора наблюдается перезарядка торцевых участков глинистых частиц. Подобный эффект связан с амфотерными свойствами бокового скола октаэдрической сетки, который ведет себя подобно гидроокиси алюминия. В кислой среде скол октаэдрической сетки диссоциирует по щелочному типу:



В щелочной среде скол диссоциирует по кислому типу:



В результате этого процесса боковой скол глинистой частицы в кислой и нейтральной средах заряжается положительно, а в щелочной – отрицательно. Изменение заряда на торцевых участках глинистых частиц приводит к формированию в щелочных условиях одноименно заряженных, а в кислых и нейтральных знакопеременных ДЭС.

Толщина диффузного слоя зависит от состава и концентрации солей в водном растворе, окружающем частицы глинистых минералов. Она максимальна при отсутствии солей и резко сокращается по мере увеличения их концентрации. Подобное поведение ДЭС в различных физико-химических условиях является одним из главных факторов, регулирующих процессы структурообразования в глинистых осадках, и оно оказывает

сильное влияние на формирование свойств глинистых пород в ходе их геологического развития.

Структура глинистых пород

Другим важным фактором, определяющим свойства глинистых пород, является их структура. Под структурой понимают размер, форму, характер поверхности и количественное соотношение структурных элементов, их ориентацию в пространстве и тип структурных связей [3].

Изучение структуры горных пород проводится на макро- и микроуровнях. На первом выявляют все особенности строения породы визуально, а на втором — с помощью оптических и растровых электронных микроскопов (РЭМ). По отношению к тонкодисперсным глинистым породам изучение их микроструктуры приобретает особое значение.

Микроструктура глинистых пород — чувствительный индикатор условий формирования породы, а различное сочетание ее признаков находится в тесной взаимосвязи со свойствами. В работах [3, 4] были подробно рассмотрены типы микроструктур глинистых пород и особенности их формирования в ходе истории геологического развития. Однако для объяснения многих свойств глинистых пород, и в первую очередь прочностных и деформационных свойств глин, помимо морфологических особенностей частиц и пор, слагающих породу, чрезвычайно большую роль играет характер структурных связей, то есть сил, действующих между минеральными частицами.

В зависимости от состава и структуры глинистой породы между частицами могут существовать такие виды взаимодействий, как гравитационные, магнитные, молекулярные, электростатические, ионно-электростатические, силы поверхностного натяжения и силы, обусловленные химическими связями. Эти силы действуют не по всей межфазной границе частиц, а только в местах их непосредственных контактов. Характер индивидуальных контактов, а также их количество являются важными показателями структуры породы, от которых зависят ее прочностные и деформационные свойства.

В глинах между минеральными частицами возможно формирование трех типов контактов: коагуляционных, переходных и фазовых. Коагуляционные контакты преобладают у молодых глинистых осадков и слабоуплотненных глин. Их характерной особенностью является наличие между частицами тонкой равновесной пленки жидкости (связанной воды), толщина которой зависит от физико-химических факторов, достигая нескольких десятков нанометров (рис. 1, а). Притяжение частиц в коагуляционном контакте обусловлено дальнедействующими молекулярными, магнитными и элект-

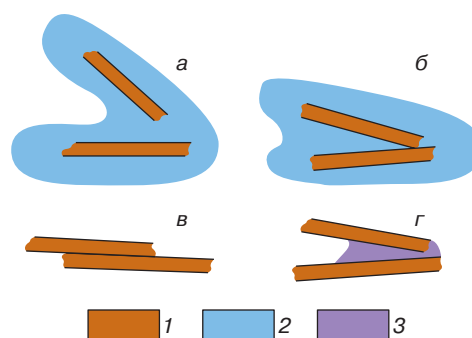


Рис. 1. Типы контактов в глинистых породах: а — коагуляционный, б — переходный, в, г — фазовый; 1 — частицы, 2 — пленки воды, 3 — цементирующее вещество

ростатическими взаимодействиями. Важными особенностями коагуляционных контактов являются малая прочность (10^{-11} – 10^{-9} Н) и обратимый характер разрушения. После разрушения они могут быстро восстанавливаться. С этим связано явление тиксотропии молодых глинистых осадков, заключающееся в потере прочности при динамических воздействиях и ее восстановлении после снятия таких воздействий.

Переходные контакты распространены в водонасыщенных плотных глинистых породах, а также в не полностью водонасыщенных глинах, находящихся в сухом и слабонасыщенном состоянии. Они характеризуются небольшой (точечной) площадью соприкосновения и образованием между частицами относительно прочной связи (10^{-8} – 10^{-7} Н) за счет действия ионно-электростатических и химических (валентных) сил (рис. 1, б). Отличительной особенностью переходных контактов является их обратимость по отношению к воздействию воды, то есть способность переходить в коагуляционные контакты при увлажнении породы и восстанавливаться при высыхании.

Фазовые контакты развиты у сильно уплотненных сцементированных глин, аргиллитов, глинистых сланцев. Они характеризуются наличием непосредственного соприкосновения между минеральными частицами на значительной контактной площади или развитием на контакте новой фазы (кремнезема, гипса, карбонатов), цементирующей минеральные частицы и микроагрегаты. Первый тип фазовых контактов часто называют кристаллизационным (рис. 1, в), а второй — цементационным (рис. 1, г). Фазовые контакты образованы ионно-электростатическими и химическими силами, что обуславливает их высокую прочность ($\geq 10^{-6}$ Н). Глинистые породы с фазовыми контактами слабо теряют свою прочность и не пластифицируются при увлажнении.

В ходе геологического развития глинистых пород наблюдаются закономерная смена типов контактов и

изменение их прочности. Так, при гравитационном уплотнении молодые глинистые осадки превращаются в пластичные глины. При этом происходит преобразование коагуляционных контактов в переходные. Дальнейшее уплотнение глин на больших глубинах при высоких давлениях и температурах приводит к трансформации переходных контактов в фазовые и формированию таких прочных глинистых пород, как аргиллиты и глинистые сланцы.

Как правило, глинистые породы, характеризующиеся присутствием того или иного типа контактов, обладают определенными свойствами. Таким образом, зная прочность этих контактов, можно оценить величину и тип структурных связей и дать прогноз прочностного поведения глинистой породы в различных условиях.

Несомненно, расчет прочности контактов между глинистыми частицами — чрезвычайно сложная задача. Ее решение затрудняется очень малым размером глинистых частиц и необходимостью иметь прецизионное оборудование для изучения слабых взаимодействий.

СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Зная факторы, определяющие свойства глинистых пород, и методы оценки минерального состава и микроструктуры, попытаемся объяснить природу некоторых важных и весьма специфических свойств глин, имеющих большое значение в жизни людей.

Набухаемость

Под набухаемостью понимают способность глинистых пород увеличивать объем в процессе взаимодействия с водой или водными растворами [1]. Процесс набухания сопровождается увеличением влажности, объема породы и возникновением давления набухания.

Набухаемость глинистых пород является их важным свойством, которое необходимо учитывать при проведении строительных работ и эксплуатации инженерных сооружений. Недооценка набухающей способности глин может привести к серьезным последствиям и авариям. На рис. 2 показана деформация гражданского здания в поселке Черноморском Краснодарского края, последовавшая после набухания глинистых грунтов, на которых оно было построено. Максимальный подъем фасада здания составил ~15 см, а давление набухания — 0,3 МПа.

Объясняя природу набухания глин, следует отметить, что этот процесс проходит в две стадии: первая стадия — адсорбционное или внутрикристаллическое набухание, вторая — макроскопическое или “осмотическое” набухание. На первой стадии глинистая порода впитывает влагу за счет адсорбции молекул воды поверхностью глинистых частиц и межслоевыми проме-



Рис. 2. Деформация гражданского здания после набухания глинистых пород основания

жутками кристаллической решетки глинистых минералов. Эта стадия практически не влияет на изменение объема породы. На второй стадии набухания поглощение влаги осуществляется с помощью осмотического давления. Оно возникает вблизи поверхности глинистых частиц за счет избыточной концентрации многочисленных обменных катионов отдиссоциированных (отошедших) с поверхности глинистых частиц в раствор. Основное увеличение объема набухающей глины происходит именно на этой макроскопической стадии.

Способность глин к набуханию характеризуется влажностью набухания (W_n) и давлением набухания (P_n). По величине давления набухания глинистые породы подразделяются на ненабухающие ($P_n < 0,025$ МПа); слабонабухающие ($P_n = 0,025-0,1$ МПа); средненабухающие ($P_n = 0,1-0,25$ МПа) и сильнонабухающие ($P_n > 0,25$ МПа) [1]. Величина и характер набухания глинистых пород определяются многими факторами, основными из которых являются рассмотренные выше минеральный состав, дисперсность и структура. Наибольшим набуханием обладают глинистые породы, в составе которых имеются глинистые минералы с подвижной кристаллической структурой (например, монтмориллонит), наименьшим — минералы с более жесткой кристаллической структурой (каолинит). Сильное влияние на набухание глин оказывает и их структура, при этом определяющее значение имеет характер структурных связей и тип контактов между минеральными частицами. Наибольшее набухание характерно для глинистых пород с переходными контактами, наименьшее — для глин с фазовыми контактами.

Глинистые породы, обладающие преимущественной ориентацией структурных элементов, характеризуются ярко выраженной анизотропией набухания. Наибольшее набухание отмечается в направлении, перпендикулярном ориентации частиц. В ходе процесса набухания происходит существенная перестройка ис-

ходной микроструктуры глинистой породы. На рис. 3, *а* показано изменение микроструктуры монтмориллоновой глины при набухании. Контакт с водой происходил по верхней границе образца (вдоль линии *А*), нижняя часть образца соответствовала сухой зоне *Г*. По мере впитывания влаги в породе происходили гидратация, разрушение и диспергация исходных микроагрегатов монтмориллоновых частиц (зона *В*). В дальнейшем частицы разворачивались по направлению действия осмотического давления и формировались новые морфологические элементы в виде вертикальных и наклонных каналов (зона *Б*), которые в плане соответствовали ячеистой микроструктуре (рис. 3, *б*). Данный процесс сопровождался трансформацией переходных контактов в коагуляционные.

Подобные изменения микроструктуры обуславливают высокую пористость набухших глин, которая в конце процесса набухания может достигать 85–90%. Степень набухания (относительное изменение объема) описанной монтмориллоновой породы за 94 ч набухания составила 350%!

Физико-механические свойства

Под физико-механическими свойствами горных пород понимают их реакцию на действие внешних нагрузок. Физико-механические свойства горных пород разделить на деформационные и прочностные.

Деформационные свойства пород характеризуют их поведение под нагрузками, не приводящими к раз-

рушению. В результате воздействия давления на породу она деформируется, что выражается в изменении ее объема и формы. Особенно ярко деформационные свойства проявляются во влажных пластичных глинах. В них под влиянием внешних нагрузок начинаются процессы уплотнения и существенного изменения объема. Так, при возведении и последующей эксплуатации сооружений может происходить значительная осадка пород, достигающая нескольких сантиметров, а иногда и более. Поэтому одними из главных вопросов, которые предстоит решать при строительстве на глинистых породах, являются прогноз осадки сооружения и оценка критических условий деформирования пород оснований, при превышении которых может наступить разрушение самого сооружения.

Есть несколько путей решения такой задачи. Наиболее точно осадка породы может быть проанализирована при штамповых испытаниях, когда на поверхность исследуемого массива породы устанавливают металлический штамп размером до 0,5 м² и на него с помощью специального домкрата ступенями подают давление. Нагрузка увеличивается до тех пор, пока штамп не начинает опускаться в исследуемую породу. По данным описанного полевого эксперимента можно установить такой важный деформационный показатель, как модуль деформации, характеризующий величину осадки глинистой породы при заданном давлении.

Определение сжимаемости пород может также проводиться и в лабораторных условиях при компрессионных испытаниях небольших по размеру образцов. В результате этих экспериментов определяется модуль деформации, с помощью которого можно рассчитать осадку глинистой породы под действием веса сооружения.

К сожалению, знание только деформационного поведения глинистых пород является недостаточным для решения проблемы устойчивости инженерных сооружений и прогноза поведения пород в различных условиях. Поэтому помимо деформационных свойств глинистых пород необходимо знать и их прочностные свойства.

Прочность пород характеризует их способность сопротивляться внешним усилиям вплоть до полного разрушения и определяется при критических (разрушающих) нагрузках, действующих на породу в момент ее разрушения.

Особую трудность представляет рассмотрение прочностных свойств глинистых пород в связи с их специфическим поведением при взаимодействии с водой. Хорошо известна потеря прочности при увлажнении глин, когда они из плотных и высокопрочных пород превращаются в пластичные или жидкотекучие тела. На рис. 4 показана фотография оползня в глинистых

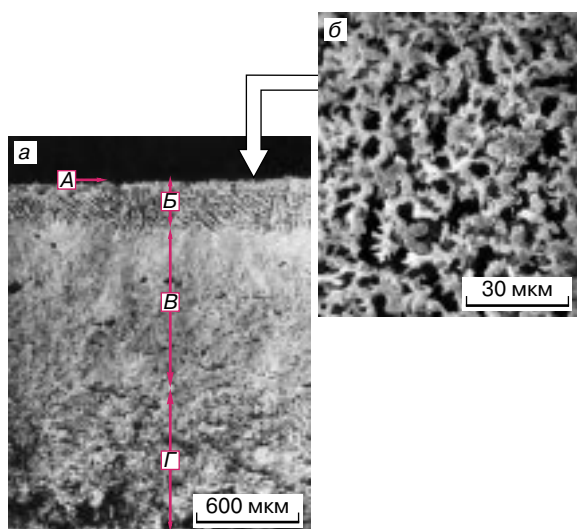


Рис. 3. Изменение микроструктуры монтмориллоновой глины при набухании: *а* – общий вид, *б* – ячеистая микроструктура зоны вертикальных каналов

породах, происшедшего в 1995 году вблизи небольшого городка Ла-Канчита в Калифорнии (США). Оползень объемом ~400 000 м³ сформировался на крутом откосе (~30°) вследствие интенсивного увлажнения в зимнее время склоновых отложений. Разрушено девять зданий, 100 семей были эвакуированы из зоны бедствия. Финансовые потери в результате оползня составили около 24 млн долларов.

Существуют различные подходы к изучению прочности глинистых пород. Один из них – классический, применяемый в механике грунтов. В рамках этого подхода прочностное поведение глинистых пород описывается с помощью зависимостей, используемых в механике сплошных сред. В данном случае чаще всего используется теория прочности Мора, объясняющая разрушение тела определенным предельным соотношением нормальных и касательных напряжений.

Одним из важнейших прочностных показателей глинистых пород является сопротивление сдвигу. В результате действия внешнего давления на породу в ней возникают касательные напряжения, которые при определенной величине преодолевают структурные связи



Рис. 4. Оползень в глинистых породах вблизи города Ла-Канчита в Калифорнии (США)

между частицами и обуславливают их смещения или сдвиги относительно друг друга. Предельное сопротивление глинистых пород сдвигу в общем случае описывается законом Кулона [1]:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где τ – сопротивление глинистой породы сдвигу, МПа; σ – нормальное напряжение (вертикальное давление) в плоскости среза, МПа; φ – угол внутреннего трения; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения (параметр, определяемый силами трения на контактах между частицами), c – сцепление (параметр, определяемый силами взаимодействия между частицами, которые сопротивляются относительному смещению этих частиц при сдвиге), МПа.

Несмотря на то что начиная с конца XVIII века проектировщики и строители использовали уравнение (1) и параметры φ и c для оценки прочности массивов глинистых пород, в рамках этой теории оказалось чрезвычайно сложно объяснить влияние различных факторов на прочность глин. Решить эти задачи помогает физико-химическая механика дисперсных грунтов. Использование физико-химических принципов для изучения прочности глинистых пород осуществляется на базе всестороннего анализа их состава и микроструктуры. Эти данные являются основой для выбора соответствующей физико-химической модели глинистой породы, которая позволяет рассчитать прочность индивидуальных контактов и определить тип структурных связей между частицами породы. В свою очередь, знание характера структурных связей, а также минерального состава глинистой породы дает возможность решать любые прогнозные задачи по оценке изменения прочностного поведения глин в тех или иных условиях.

В рамках физико-химической механики дисперсных грунтов процесс формирования катастрофического оползня в Ла-Канчите можно объяснить следующим образом. В результате увлажнения глинистых пород, слагающих склон, произошла трансформация более прочных переходных контактов в коагуляционные, сопровождающаяся существенным ослаблением структурных связей. Уменьшение прочности структурных связей привело к резкому повышению сдвиговых напряжений и началу сдвиговых деформаций по наиболее ослабленным участкам склона. В ходе нарастания сдвиговых деформаций в глинах, находящихся в пределах зоны сдвига, происходила переориентация глинистых частиц и шло формирование поверхностей скольжения (рис. 5). Необходимо отметить, что на начальных стадиях оползневой процесса ширина зоны сдвига в глинистых породах имеет микроскопические размеры и обычно не превышает 10–100 мкм. После достижения сдвиговыми деформациями критической величины ус-

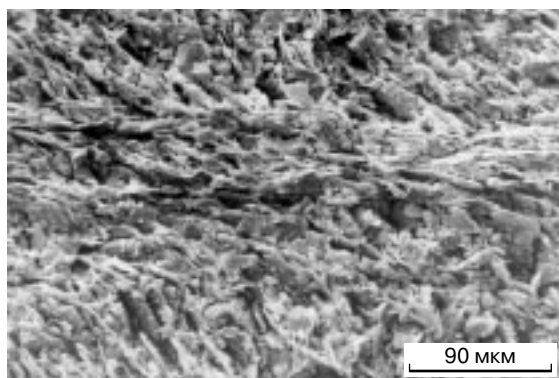


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности скольжения в глинистой породе, слагающей оползень

тойчивость склона была нарушена и произошло смещение крупного оползня.

Описанный процесс можно было бы довольно точно спрогнозировать используя физико-химический подход к оценке прочностного поведения глинистых пород, изменяющегося в результате воздействия повышенной влажности и трансформации типа контактов между глинистыми частицами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены лишь некоторые особенности состава, структуры и свойств глинистых пород. Тем не менее даже из этого краткого сообщения видно, что природа свойств глин чрезвычайно многолика и слож-

на. Решению многих проблем, связанных с такими породами, помогает использование современных методов исследования, разработанных в грунтоведении и физико-химической механике дисперсных пород. Применение этих методов позволяет объяснить влияние многих факторов на свойства глин и спрогнозировать изменение их свойств в условиях изменяющейся окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / Под ред. Е.М.Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1983. 389 с.
2. *Королев В.А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 9. С. 79–85.
3. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
4. *Соколов В.Н.* Микромир глинистых пород // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 3. С. 56–64.

Рецензент статьи Д.Ю. Пушаровский

* * *

Вячеслав Николаевич Соколов, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Основные направления научных исследований – физико-химическая механика дисперсных грунтов, изучение микроструктуры горных пород. Автор 230 научных работ, десяти авторских свидетельств и пяти зарубежных патентов.