

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТРУКТУРНЫХ КОНТАКТОВ В ДИСПЕРСНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

© 2021 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}, К. Н. Абросимов^{2,**}, О. В. Сереброва¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*E-mail: kafs08@bk.ru

**E-mail: kv2@bk.ru

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.

После доработки 02.07.2021 г.

Принята к публикации 02.07.2021 г.

Рассматриваются приемы и способы определения числа структурных контактов в глинистых грунтах – важной физико-химической характеристики их структурного строения. Проведенные исследования методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT) подтвердили возможность применения данного метода не только для исследования микроструктурного строения глинистых грунтов, но и для прямого определения числа контактов между минеральными частицами в них. На основании результатов исследований было уточнено количество контактов различного преобладающего типа в разновидностях дисперсных глинистых грунтов и получены эмпирические зависимости количества контактов в глинах от их гранулометрического состава. Полученные данные подтверждают разработанные В.Н. Соколовым модели микроструктурного строения разновидностей глинистых грунтов – “бидисперсную” и “перекашивающегося карточного домика”.

Ключевые слова: глинистые грунты, структурные контакты, тип контакта, количество контактов, структурное строение, mCT, компьютерная томография

DOI: 10.31857/S0869780921050064

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время строительство инженерных объектов и хозяйственное освоение территорий все более часто характеризуется повышенной сложностью и ответственностью сооружений, специфическими геологическими условиями и строением грунтов оснований, разнообразием и величиной нагрузок и воздействий на них. В таких условиях существенно возрастают требования к качеству инженерно-геологических исследований, результаты которых должны не только полно и объективно характеризовать свойства грунтов, но и давать достоверный прогноз их изменения в течение всего жизненного цикла инженерных объектов.

В практике грунтоведения в общем случае изучение свойств грунтов проводится по общепринятым методикам, основанным на положениях классической механики грунтов. Принципиальные положения этих методик применяются уже многие десятилетия, являясь устоявшимися и, в целом, позволяют решать практические задачи изысканий. Наряду с этим, во многих случаях, результаты стандартных испытаний противоречат поведению грунтов в реальных условиях, и эти

противоречия становятся более явственными при усложнении современных условий изысканий. В первую очередь эти противоречия возникают при исследованиях дисперсных глинистых грунтов и не имеют удовлетворительного объяснения с позиций действующей теории. Это связано с тем, что принципы классической механики, на которых основывается научно-методическая база грунтоведческих испытаний, не могут быть в полной мере отнесены к глинам, имеющим отличное от сплошных упругих тел строение.

Современные научные представления о строении глин, сформулированные в физико-химической теории прочности грунтов, рассматривают их как дисперсные системы, в которых вода не только заполняет поровое пространство, но и взаимодействует с минеральными частицами дисперсной фазы, образуя вокруг них гидратные пленки и формируя дисперсионную среду системы. В результате взаимодействия минеральных частиц между собой и гидратными пленками образуются структурные контакты, формирующие структуру грунта и определяющие его свойства, так как все напряжения, возникающие в грунте, передаются непосредственно на площадки кон-

тактов. Физико-химическая теория рассматривает не только внешние воздействия на грунт, но и вызванные ими изменения его структурного строения. Такой подход к исследованию свойств глинистых грунтов позволяет повысить объективность и достоверность их определения и прогноза изменения, при этом для его широкого практического применения необходимо решить ряд научно-методических вопросов, создающих затруднения и неопределенности при проведении исследований. Одним из таких важных вопросов является определение количества контактов между минеральными частицами грунта.

СТРУКТУРНОЕ СТРОЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

В основе современных представлений о строении глинистых грунтов лежат представления о дисперсных системах коллоидной и физической химии – положения фундаментальных теорий устойчивости дисперсных систем ДЛФО (сокр. от теория Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина. Эти базовые теории были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Н.А. Румянцевой [6–8] и другими учеными и послужили основой разработанной в настоящее время физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах.

Эта теория описывает структурообразование глин за счет формирования контактов между частицами глинистых минералов, при этом все внешние напряжения, действующие на грунт, передаются на площадки контактов и концентрируются там, а общая прочность глинистой дисперсной системы определяется суммарной прочностью отдельных контактов.

Для характеристики прочности глинистого грунта как дисперсной системы В.И. Осиповым [7] было введено понятие реальной эффективной прочности, которая характеризуется величиной реального эффективного напряжения σ' на контактах при их разрушении. Эта величина зависит от общего эффективного давления в грунте σ' , количества χ и площади a_c контактов и расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi(h)$. Таким образом, количество контактов в глинистом грунте является одним из важных факторов, необходимым для общей характеристики самого грунта с позиций его структурного строения.

Прямое определение количества контактов между глинистыми частицами в грунте является сложной научной и практической задачей. Распространенных и общедоступных способов определения таких показателей в современной при-

борно-методической базе грунтоведческих исследований нет. Проводимые в данном направлении исследования ориентированы, в первую очередь, на разработку расчетных моделей, и их результаты важны не только с фундаментальных научных, но и с практических позиций.

Расчеты количества контактов в грунтах основаны на построении моделей строения дисперсных структур. П.А. Ребиндером, Е.Д. Шукиным и Л.Я. Марголисом [9] для дисперсных структур, сложенных сферическими частицами, была разработана глобулярная модель строения, представления о которой позднее были расширены Е.А. Амелиной и Е.Д. Шукиным [2]. Глобулярные модели построены из прямолинейных цепочек соприкасающихся сферических частиц, расположенных по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Места пересечения цепочек образуют узлы структуры, которая характеризуется структурным параметром N – средним количеством частиц между узлами, связанным с пористостью грунта n . Число контактов χ в единице площади зависит от величины параметра N и среднего радиуса частиц r .

В.Г. Бабак [3] для расчета числа контактов в рамках глобулярной модели предложил формулу, согласно которой число контактов χ зависит от величины координационного числа z , равной среднему числу контактов каждого структурного элемента с соседними, пористости n и среднего радиуса структурного элемента r .

Для расчета величины координационного числа (z) В. Филд (W.G. Field) [16] и В. Грей (W.A. Gray) [17] разработали различные формулы его зависимости от коэффициента пористости и пористости.

Глобулярная модель описывает строение систем, структурные элементы которой имеют форму, близкую к сферической, и может применяться по отношению к песчаным грунтам. Эта модель не учитывает анизотропию формы частиц глинистых минералов и не может применяться для достоверного описания структуры глинистых грунтов. Этот недостаток помогает устранить разработанная В.Н. Соколовым [12] “бидисперсная глобулярная модель”, на основе которой можно определить количество контактов в системе, сложенной частицами разного размера – крупными, с радиусом R , и мелкими, с радиусом r . Такая модель описывает строение супесей и легких суглинков, в составе которых присутствуют как глинистые, так и пылеватые и песчаные частицы, различающиеся по размеру. В соответствии с этой моделью, общее число контактов (χ) равно произведению числа контактов между крупными частицами (χ_R) и числа контактов между мелкими частицами (χ_r), находящимися в пределах площади контактов крупных частиц. Величины χ_R и χ_r

определяются в зависимости от плотности и содержания крупных и мелких частиц, соответственно ρ_R , ρ_r , Φ_R и Φ_r .

Расчеты, проведенные В.Н. Соколовым по бидисперсной глобулярной модели, показали, что число контактов в единице площади для суглинков может меняться в пределах $1.2 \cdot 10^7 - 1.0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Для глин, в строении которых решающую роль играют глинистые частицы анизотропичной формы, В.Н. Соколовым [11, 12] была разработана модель “перекашивающегося карточного домика”, стенками которого являются тонкие диски, моделирующие глинистые частицы. Оценка степени уплотненности пород в этой модели дается через показатель θ – средней величины угла между частицами, связанной с пористостью n . Число контактов в такой модели рассчитывается в зависимости от величины θ , среднего значения диаметров a и толщины b дисков, которые могут быть определены при количественном анализе микроструктуры глины под растровым микроскопом.

Расчеты В.Н. Соколова по этой модели показали, что число контактов в единице площади для морской хвалынской глины составляет $3.9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Приведенные данные получены в результате сложных уникальных экспериментальных исследований. Их значение тем более высоко, что они являются основой для расчетов прочности индивидуальных контактов и реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описанные выше способы определения количества контактов в грунтах являются расчетными и основаны на моделировании структурного строения. При этом, на основе данных В.Н. Соколова ранее был проведен практический расчет количества контактов и их реальной эффективной прочности в разновидностях глинистых грунтов [5]. Полученные расчетные значения количества контактов в единичном объеме грунтов, приведенные в табл. 1, важны для определения реальных и общих эффективных напряжений в грунтах, тем не менее требуется их уточнение.

Для непосредственного определения количества контактов между частицами глинистых грунтов были проведены специальные компьютерные томографические исследования. Компьютерная томография – не повреждающий метод исследования, применяемый в различных сферах от исследования структуры материалов до внутреннего строения биологических объектов. Метод нашел свое применение и в исследовании структуры и микроструктуры почв [14, 20, 21, 23] и почвоподобных образований [1].

Исследования глин методом компьютерной томографии были проведены в Почвенном ин-

Таблица 1. Число контактов в разновидностях глинистых грунтов

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см^3)
глина тяжелая	$3 \cdot 10^8$
глина легкая	$2.7 \cdot 10^8 - 2.9 \cdot 10^8$
суглинок тяжелый	$2.4 \cdot 10^8 - 2.7 \cdot 10^8$
суглинок легкий	$2.1 \cdot 10^8 - 2.5 \cdot 10^8$
супесь	$1.9 \cdot 10^8 - 2.1 \cdot 10^8$

ституте им. В.В. Докучаева в лаборатории физики и гидрологии почв Абросимовым К.Н. Для съемки и анализа томографических данных использовано оборудование и программное обеспечение (ПО) Bruker – микротомограф SkyScan 1172G, ПО STan 1.18 (расчеты морфометрических показателей) и СТvox (визуализация объемной структуры).

В настоящее время не существует стандартизированных методик томографического исследования почв и близких к ним по химическому составу объектов, поэтому авторы статьи использовали накопленный опыт в области томографии почв.

Для исследования было выбрано разрешение близкое к максимально детализированному – 1 мкм. Почвенные объекты аналогичного или близкого к нему разрешения уже исследовались методом компьютерной томографии [14, 21], но при этом влажность образцов не учитывалась. Наиболее близкий по микроструктуре и рентгеновскому поглощению объект естественного происхождения – лессовые структуры, был исследован авторами [1]. Исходя из этого опыта, были выбраны способы упаковки препарата для томографии, а также настройки съемки образцов глины и реконструкции их структуры.

Особенность микротомографа – высокое разрешение и качественную детализацию можно получить только в образцах небольшого размера. Так для разрешения 1 мкм диаметр образца должен быть около 2 мм. Кроме того, необходимо было избежать процессов усадки глины из-за высыхания и создать условия для хорошей центровки препарата в томографе. Образец глинистого грунта был помещен в трубку из прозрачного ПВХ с внутренним диаметром 1.9 мм, которая была затем загерметизирована пластилином, и вся конструкция помещена в медицинский шприц (рис. 1).

Томографическая съемка осуществлялась только для центральной части каждого препарата. При подготовке к анализу данные были сегментированы в ручном режиме (manual thresholding)

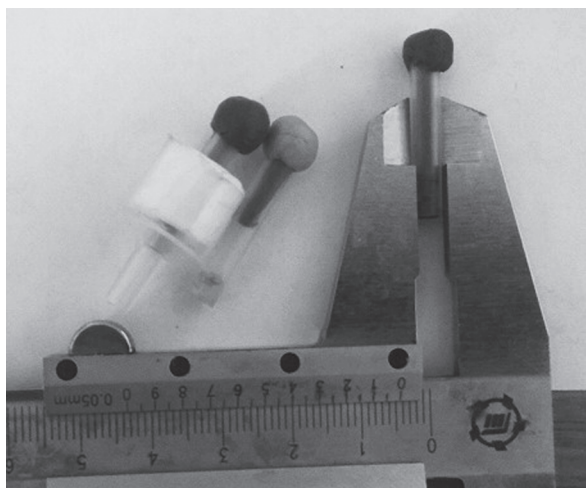


Рис. 1. Готовый препарат для томографической съемки.

на две рентген-контрастные фазы — минеральные частицы и поровое пространство (рис. 2).

Расчет морфометрических показателей производился по программному анализу объемной структуры образца в форме куба, вписанного в объем томографических данных со стороной 1.5 мм.

Анализ томографических данных (стека томографических изображений) позволяет получить показатели томографической пористости в объеме, а также ряд количественных показателей — количество объектов, количество связей (контактов) и количество закрытых пор (обособленных объектов). Доступны показатели объемов и площадей для каждой фазы, ориентация относительно заданного направления и показатель связности структур — число Эйлера. Количество объектов и количество контактов — составные параметры определения числа Эйлера (связности) [24], которые можно использовать как параллельно с ним, так и по отдельности. Можно настроить расчет локальной толщины элементов каждой из рентген-контрастных фаз [15, 22], что может показать различия при каком-либо физическом воздействии, например, изменении влажности и др.

Томографическая пористость — пористость по результатам анализа объемной структуры, состоящей из стека томографических изображений (срезов). Ее определение ограничено как минимум разрешением съемки (поры ниже разрешения будут невидны, или же пористо-зернистая структура, где поры и зерна одного размера, но ниже разрешения съемки, будет выглядеть на томографическом изображении как промежуточная фаза между порой и твердой фазой), а чаще всего сочетанием разрешения и результатом примене-

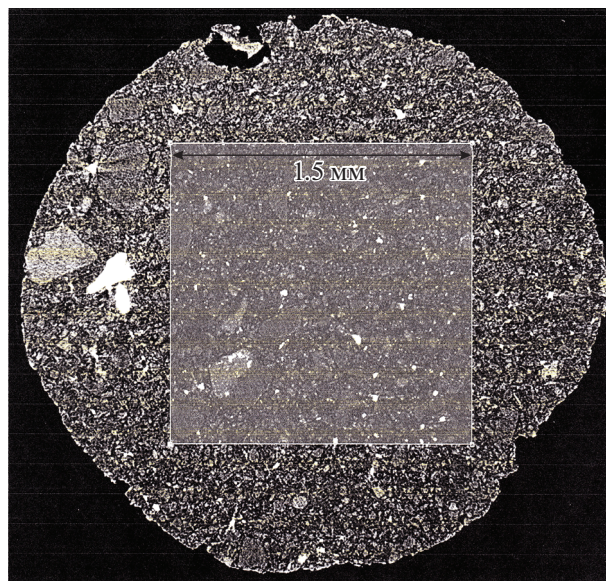


Рис. 2. Область расчетов морфометрических показателей на горизонтальном томографическом срезе.

ния программных фильтров, используемых для борьбы с цифровыми шумами и прочими артефактами изображения. Значения томографической пористости могут отличаться от значений пористости, измеряемой более традиционными методами (ртутная порометрия и др.), особенно на пределе разрешения. При этом данный метод исследований позволяет не только определять общую пористость, но и выделять в ней количество закрытых пор, что является важным показателем, определяющим многие особенности строения и свойств глинистых грунтов [19]. В представленном исследовании авторы ограничились показателями общей и закрытой пористости, количества объектов и количества контактов (связей) для твердой фазы. Локальная толщина частиц твердой фазы и пор, а также эйлерова характеристика связности частиц твердой фазы использованы как вспомогательные показатели в качестве индикаторов неоднородности структуры (рис. 3, 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на образцах легкой моренной глины (*gPms*). Для испытаний изготавливались искусственные монолиты полностью водонасыщенных грунтов в твердом, пластичном и текучем физико-химическом состояниях, соответственно, с преобладанием в их микроструктуре переходных точечных, ближних и дальних коагуляционных контактов [4]. По данным лабораторных исследований, выполненных по норма-

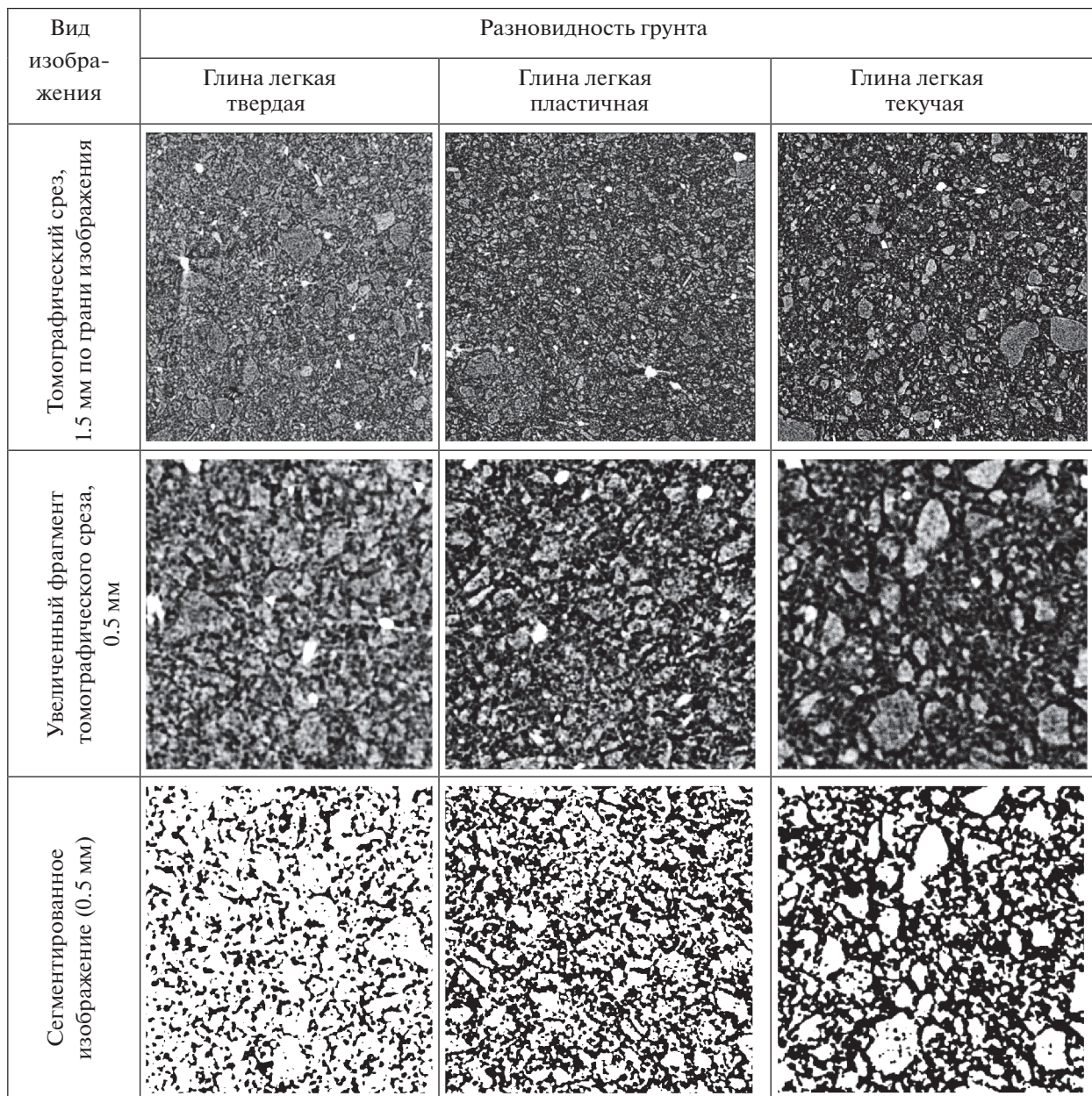


Рис. 3. Легкая глина, томографическое изображение внутренней структуры фрагмента образца и сегментированное изображение на поры (черный цвет) и твердую фазу (белый цвет).

тивам ГОСТ 12536¹ и ГОСТ 5180², влажность глин составляет 25% для твердой разновидности грунта, 35% – для пластичной и 45% – для текучей; плотность, соответственно, 2.02, 1.88 и 1.77 г/см³, пористость – 40.6%, 48.8% и 55.1%, число пла-

стичности – 17.7%. В гранулометрическом составе глин присутствуют частицы песчаной – 8.1%, пылевой – 48.9% и глинистой фракций – 43%, при этом количество частиц 0.002-0.001 мм составляет 8.4%, а частиц мельче 0.001 мм – 34.6%.

На томографических изображениях исследованных образцов (см. рис. 3) показана их внутренняя структура. Визуально образцы отличаются друг от друга более высокой плотностью деталей на изображении твердой глины с улучшением детализации для пластичной и, особенно, текучей глины. Анализ томографических данных ос-

¹ ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200116022>

² ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200126371>

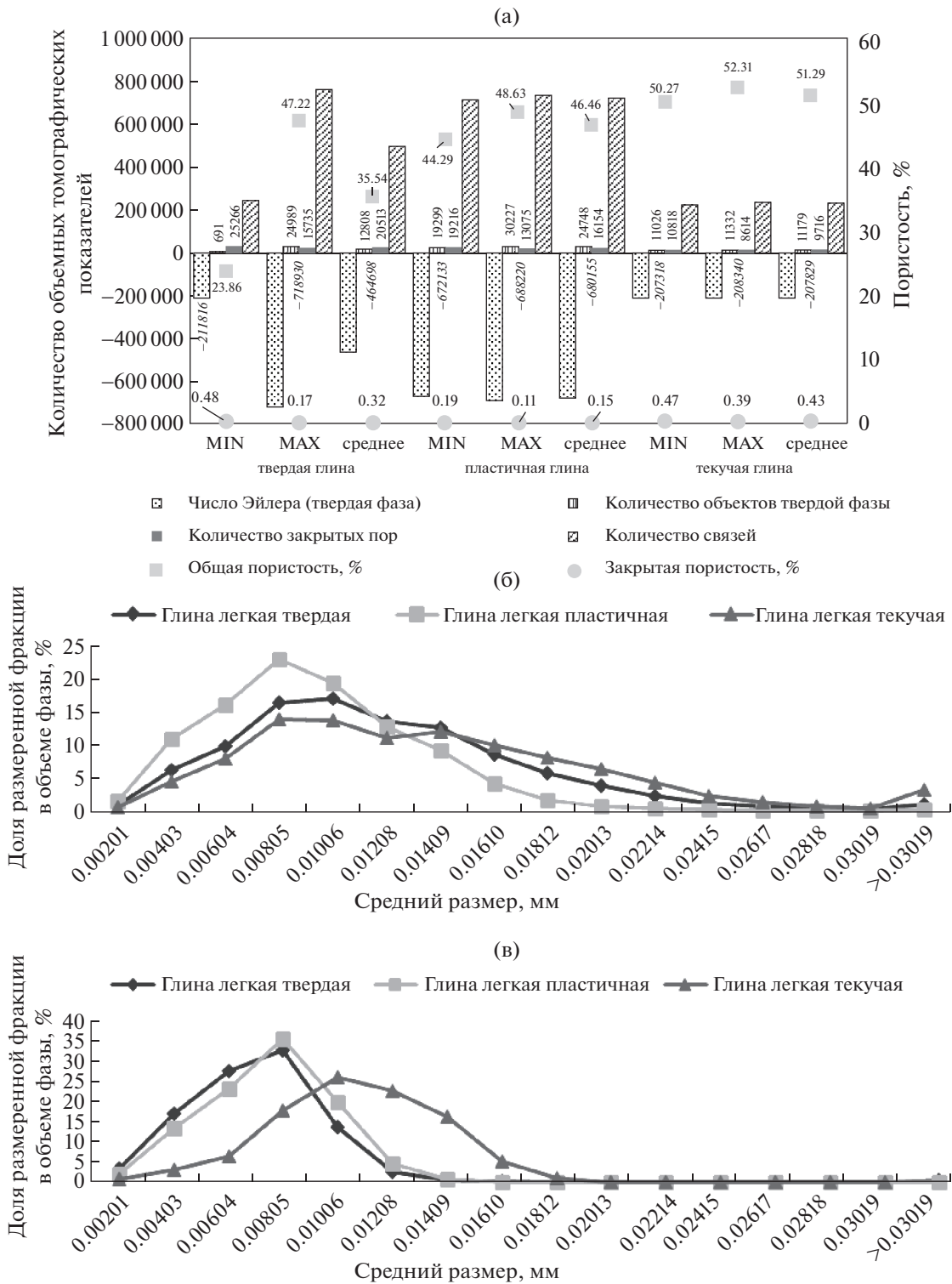


Рис. 4. Результаты анализа томографических данных. а – объемные томографические показатели; б – локальная толщина структурных элементов твердой фазы; в – локальная толщина элементов порового пространства.

нован на анализе сегментированного изображения на поровое пространство и твердую фазу. В его основе лежит разрешение съемки – точность сегментации. Учитывая плотное сложение твердой глины и выявленные неоднородности структуры (воздушные пузыри, частицы песка и др.),

было проведено несколько расчетов в разных частях исследуемого образца, пересекающихся между собой.

Согласно анализу данных томографических исследований, общая пористость твердой разновидности глин – 35.6%, пластичной – 46.5%, те-

кучей – 51.3%, средний размер пор, соответственно, 0.0066, 0.0073 и 0.0107 мм. Для исследованных грунтов количество закрытых пор составляет 0.15–0.47%. Глины твердой консистенции характеризуются неоднородной по прочности и пористости структурой. В пластичной разновидности глины структура однородная с преобладанием более мелких твердых частиц, более пористая, сопоставимая по прочности с твердой. Глины текучей консистенции обладают наиболее однородной, высокопористой, самой непрочной структурой.

Значения количественных показателей структурного строения глинистых грунтов, определенные по анализу, в целом сильно зависят от качества изображения и его сегментации, в наименьшей степени это проявляется при определении показателей пористости. Сопоставление полученных результатов с результатами лабораторных исследований, проведенных по стандартным нормативным методикам ГОСТ, показывает их хорошую сходимость. Это свидетельствует о том, что объективные погрешности обработки томографических изображений не приводят к значительному снижению точности их результатов. Все это показывает, что метод компьютерной томографии позволяет достоверно и объективно исследовать и характеризовать строение и состав глинистых грунтов.

Определенные расхождения в количественных показателях можно объяснить особенностями анализируемого изображения. На рис. 3 показана структура и результат сегментации образцов, где видно, что более крупные частицы неоднородны по рентгеновской прозрачности и представлены разными градациями серого. Скорее всего это проявление внутренней пористости, частично видимой при используемом разрешении. Это то, что дает основную долю закрытых пор в анализируемых образцах, но и это же вносит искажения в показатели локальной толщины и особенно сильные – в расчет количественных показателей, таких как количество связей (контактов) и количество частиц. Программа-анализатор (STan) считает частицу с внутренними порами не как одно целое, а как конгломерат более мелких частиц с большим количеством “толстых” связей между ними. Именно это привело к завышению показателей для пластичной глины (где по результатам локальная толщина частиц минимальна, а количество отдельных частиц самое большое).

Решение этой проблемы – сделать изображения контрастными с четко различимыми границами фаз, что будет предельно удобно для анализа [14]. Требуется серьезная методическая проработка вопроса точности применения компьютерной томографии грунтов на пределе разрешения прибора, чтобы утверждать о высокой степени достоверности полученных данных, когда их

нельзя проверить другими методами. Томография способна показать минимальные различия в микроструктуре и поровом пространстве между образцами целой серии или выборки, главное – сделать так, чтобы сама серия соответствовала тому, что “есть на самом деле”, т.е. поры – это с максимальной вероятностью поры, а твердая фаза – это твердая фаза. С решением этой задачи могут справиться технологии машинного обучения [18].

Наряду с общей характеристикой строения грунтов, проведенные исследования позволили непосредственно определить количество контактов между частицами в них. Для твердой разновидности глины количество контактов в единичном объеме грунта составляет $2.78 \cdot 10^8$ – $2.88 \cdot 10^8$ см⁻³, что совпадает с расчетными данными, приведенными в табл. 1. Для пластичных разновидностей легких глины определенное количество контактов в единичном объеме грунта составило $2.58 \cdot 10^8$ – $2.65 \cdot 10^8$ см⁻³, для текучей глины – $2.29 \cdot 10^8$ см⁻³. Эти результаты позволили уточнить результаты расчета количества контактов для пластичных и текучих глинистых грунтов с преобладающими ближними и дальними коагуляционными типами контактов, приведенные в табл. 2.

Вышеописанные методы исследований позволяют дать оценку количества контактов в глинистых грунтах, при этом в силу объективных причин их широкое практическое применение затруднительно. Для проведения таких определений в инженерно-геологических исследованиях требуется разработка методики оценки и расчета количества контактов в глинах по результатам общепринятых стандартных испытаний.

Очевидно, что одним из основных факторов, определяющих число контактов в глинах, служит их гранулометрический состав, а именно количество глинистых частиц в грунте. Однако связь между содержанием глинистой фракции и количеством контактов не является прямо пропорциональной, чему существует несколько причин, основные из которых будут рассмотрены ниже.

В практике грунтоведения принято разделение грунтов по размерности слагающих их частиц. Такой подход к выделению дисперсных фракций был заложен В.В. Охотиным и, с отдельными изменениями, применяется и в настоящее время. В соответствии с размером частиц в грунтах выделяются крупнообломочная, песчаная, пылеватая и глинистая фракции. При этом размерность глинистой фракции до сих пор остается дискуссионной. До недавнего времени к глинистой фракции относились частицы размером менее 0.005 мм, что было зафиксировано в нормативных документах, и выделение более мелких фракций в общей практике инженерно-геологических изысканий не проводилось. В настоящее время верхней

Таблица 2. Число контактов различного типа в разновидностях глинистых грунтов

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см ³) с преобладающим типом контактов		
	переходным точечным	ближним коагуляционным	дальним коагуляционным
глина тяжелая	$3.0 \cdot 10^8 - 3.2 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^8 - 3.0 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^8 - 2.6 \cdot 10^8$
глина легкая	$2.7 \cdot 10^8 - 2.9 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^8 - 2.7 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^8 - 2.4 \cdot 10^8$
суглинок тяжелый	$2.4 \cdot 10^8 - 2.7 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^8 - 2.5 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8 - 2.2 \cdot 10^8$
суглинок легкий	$2.1 \cdot 10^8 - 2.5 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8 - 2.3 \cdot 10^8$	$1.7 \cdot 10^8 - 2.0 \cdot 10^8$
супесь	$1.9 \cdot 10^8 - 2.1 \cdot 10^8$	$1.7 \cdot 10^8 - 2.0 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^8 - 1.7 \cdot 10^8$

границей глинистой фракции признана размерность частиц 0.002 мм, это положение закреплено в современных действующих нормативных документах ГОСТ 25100³ и ГОСТ 12536. В то же время многие ученые придерживаются мнения, что к глинистой фракции следует относить частицы мельче 0.001 мм [10, 13]. При этом в практике изысканий принято считать, что содержание частиц глинистой фракции в грунтах соответствует содержанию в них глинистых минералов, определяющих их физико-химические свойства. Это далеко не всегда соответствует действительности и, в общем случае, проводить аналогию между содержанием глинистой фракции и количеством глинистых минералов неправомерно. Этот вопрос был подробно рассмотрен В.Г. Шлыковым [13], который показал, что в составе глинистой фракции могут находиться как глинистые, так и неглинистые минералы, так же как частицы глинистых минералов могут иметь размеры, соответствующие пылеватой фракции, соответственно, содержание глинистой фракции в грунтах и ее верхний размер в общем случае не отражают их минеральный состав и свойства.

Для определения взаимосвязи содержания глинистой фракции грунтов и количества контактов для разновидностей моренных грунтов (gPms) был проведен сравнительный анализ содержания частиц мельче 0.005 мм, 0.002 мм, определенных по нормативам ГОСТ 12536, и мельче 0.001 мм – по нормативам ASTM⁴, с расчетными показателями количества контактов для тех же грунтов, приведенными в табл. 2.

Анализ образцов естественного сложения и искусственных монолитов (всего более 150) показал, что наилучшей взаимосвязью с расчетными данными по количеству контактов обладает фракция частиц размером менее 0.002 мм. Эта зависимость, характерный график которой показан

на рис. 5, имеет два различных тренда – для глин (линия 1 на рис. 5) и для супесей и легких суглинков (линия 2 на рис. 5). Для исследованных грунтов зависимости количества контактов (χ) от содержания фракции <0.002 мм (N) для каждого из преобладающих типов контактов описываются эмпирическими уравнениями, приведенными в табл. 3, с достоверностью аппроксимации 0.98–1.00.

Тяжелые суглинки занимают в этом ряду промежуточное положение, для них зависимость числа контактов от содержания гранулометрической глинистой фракции может определяться как одним, так и другим уравнением.

Для фракций <0.005 мм зависимость количества контактов от содержания частиц носит, в целом, характер, аналогичный описанному выше для частиц мельче 0.002 мм, но имеет более низкий коэффициент корреляции рассматриваемых параметров (0.63–0.93). Это показывает, что содержание в грунтах гранулометрической фракции размером <0.002 мм в наибольшей степени соответствует содержанию в них глинистых частиц.

Двойственный характер зависимости определяется особенностями микроструктурного строения глинистых грунтов. Как уже было показано выше, в строении тяжелых и легких глин основную роль играют собственно глинистые частицы, и их структура описывается моделью “перекашивающего карточного домика”, разработанной и описанной В.Н. Соколовым. Для супесчаных и суглинистых грунтов характерно наличие в составе, наряду с глинистыми, значительного количества пылеватых и песчаных частиц. Их строение описывается бидисперсной структурой, предложенной также В.Н. Соколовым. Тяжелые суглинки, характеризующиеся промежуточным между супесчано-суглинистыми и глинистыми разновидностями грунтов составом, имеют в своем строении элементы как бидисперсной структуры, так и структуры перекашивающего карточного домика. Такое строение тяжелых суглинков определяет то, что количество контактов в них описывается закономерностями, характерными как для

³ ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095052>

⁴ ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. URL: <https://www.astm.org/Standards/D422>.

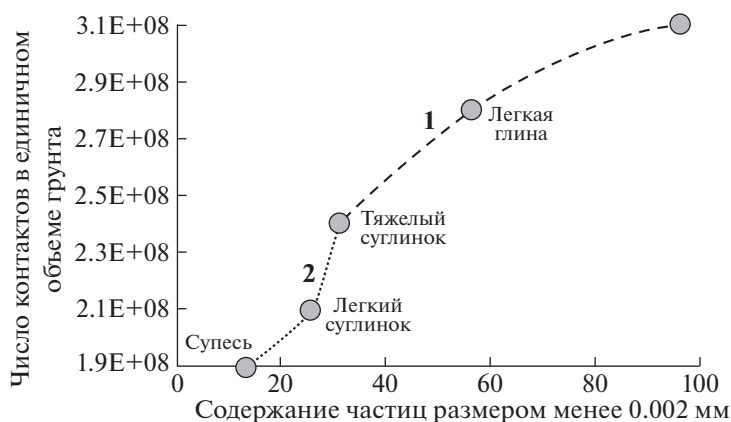


Рис. 5. Характер зависимости количества контактов в глинистых грунтах от гранулометрического состава.

супесчано-суглинистых, так и для глинистых разновидностей.

ВЫВОДЫ

В современных научных представлениях о строении и свойствах глин все большее значение приобретает физико-химический подход. Глинистые грунты рассматриваются как дисперсные системы, строение и свойства которых определяются результатом взаимодействия глинистых минеральных частиц и формированием контактов между ними. Такой подход позволяет разрешить многие противоречия, возникающие при рассмотрении свойств глинистых грунтов с позиций физики сплошных упругих тел, однако его практическое применение в инженерно-геологических исследованиях встречает ряд затруднений. Отдельные научно-методические вопросы до сих пор не имеют однозначного решения.

Одним из таких важных вопросов является методика определения количества контактов между частицами глинистых дисперсных систем, которое необходимо для определения величины реальных эффективных напряжений в грунте. От-

дельные успешные исследования этого вопроса являются, по сути, уникальными исследованиями, и их широкое применение в практических изысканиях пока затруднено.

В то же время при изучении микростроения глинистых пород может успешно применяться метод компьютерной рентгеновской томографии (X-ray мСТ). Результаты проведенных исследований показали, что характеристики внутреннего строения глинистых грунтов, определенные методом анализа томографических изображений, имеют высокую сходимость со значениями тех же характеристик, определенными по стандартным методикам, принятым в практике грунтоведения.

При этом томографические исследования позволяют увеличить количество показателей структурного строения грунтов. Одним из таких показателей является количество контактов между минеральными частицами, определяемое их непосредственным подсчетом в исследуемом объеме. Полученные результаты позволили уточнить количество контактов в разновидностях глинистых грунтов с различным преобладающим их ти-

Таблица 3. Зависимость числа контактов в единичном объеме глинистых грунтов от их гранулометрического состава

Разновидности грунтов	Преобладающий тип контактов	Зависимость числа контактов (χ) в 1 см^3 от содержания частиц (N) размером менее 0.002 мм, %
Тяжелые и легкие глины	переходный точечный	$\chi = N \cdot 1^6 + 2^8$
	ближний коагуляционный	$\chi = N \cdot 774225 + 2^8$
	дальний коагуляционный	$\chi = N \cdot 678577 + 2^8$
Легкие суглинки и супеси	переходный точечный	$\chi = N \cdot 3^6 + 2^8$
	ближний коагуляционный	$\chi = N \cdot 3^6 + 1^8$
	дальний коагуляционный	$\chi = N \cdot 2^6 + 1^8$

пом, расчет которых был проведен авторами ранее.

На основании результатов проведенных исследований были получены эмпирические зависимости количества контактов в грунте от его гранулометрического состава для разновидностей глинистых грунтов. Наиболее корректно число контактов описывается зависимостью от содержания частиц фракции <0.002 мм. Зависимость имеет различный характер для тяжелых и легких глин и супесчано-суглинистых разновидностей, при этом тяжелые суглинки занимают промежуточное положение, количество контактов в них может быть описано как одной, так и другой корреляцией.

Такой характер распределения контактов в глинистых грунтах определяется особенностями их микроструктурного строения. Тяжелые и легкие глины, в строении которых основную роль играют собственно глинистые частицы, имеют структуру “перекашивающего карточного домика”. Для супесчаных и суглинистых грунтов характерно наличие в составе, наряду с глинистыми, значительного количества пылеватых и песчаных частиц, и их строение описывается бидисперсной структурой [12]. Тяжелые суглинки, характеризующиеся промежуточным между супесчано-суглинистыми и глинистыми разновидностями грунтов составом, имеют в своем строении элементы как бидисперсной структуры, так и структуры “перекашивающего карточного домика”.

Полученные данные, бесспорно, требуют своего дальнейшего изучения и уточнения, но на начальном этапе могут применяться для определения реальной эффективной прочности.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания по теме НИР № г.р. АААА-А19-19021190077-6.

Томографическая съемка выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева (рег. номер 441994, <https://ckp-rf.ru442994>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абросимов К.Н., Макеев А.О., Багрова С.М.* Микроструктура и поровое пространство лессовых отложений нижней Волги // Экология и палеоэкология почв и палеопочв. Новосибирск: Издательский дом ООО “Окарина”, 2017. С. 7–12.
2. *Амелина Е.А., Шукин Е.Д.* Изучение некоторых закономерностей формирования контактов в пористых дисперсных структурах // Коллоидн. журнал. 1970. Т. 32. № 6. С. 795–800.
3. *Бабак В.Г.* Прочность пористых твердых тел // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1974. 20 с.
4. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72. <https://doi.org/10.1134/S86978031804004X>
5. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60. <https://doi.org/10.31857/S869-78092019548-60>
6. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 210 с.
7. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 74 с.
8. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
9. *Рибиндер П.А., Шукин Е.Д., Марголис Л.Я.* О механической прочности пористых дисперсных тел // ДАН. 1964. Т. 154. № 3. С. 695–698.
10. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др.* Грунтоведение (Изд. 4). М.: Изд-во МГУ, 1983. 386 с.
11. *Соколов В.Н.* Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 28–41.
12. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
13. *Шлыков В.Г.* Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. М.: ГЕОС. 2006. 176 с.
14. *Abrosimov K.N., Gerke K.M., Semenov I.N., Korost D.V.* Otsu’s algorithm in the segmentation of pore space in soils based on tomographic data // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. № 4. P. 560–571. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040037>
15. *Chiang Martin Y.M., Landis F.A., Xianfeng Wang, Smith J.R., Cicerone M.T., Dunkers J., Luo Yanfeng.* Local Thickness and Anisotropy Approaches to Characterize Pore Size Distribution of Three-Dimensional Porous Networks. Tissue Eng. Part C: Methods. 2009. P. 65–76. <https://doi.org/10.189/ten.tec.208.0298>
16. *Field W.G.* Towards the statistical definition of a granular mass // Proc. 4th Australia-New Zealand conf. on solid mechanics, 1963. P. 143–148.
17. *Gray W.A.* The packing of solid particles. Chapman and Yall Ltd., 1968. 236 p.
18. *Lavrukhin E.V., Gerke K.M., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V.* Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil xct images based on pore-scale modelling of saturated flow properties // Soil and Tillage Research. 2021. V. 209. P. 104942.
19. *Osipov V.I., Karpenko F.S., Rumyantseva N.A.* Active porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay // Water Resources. 2015. V. 42. № 7. P. 951–957.

20. Romanis T., Sedov S., Lev S., et al. // Landscape change and occupation history in the Central Russian Upland from Upper Palaeolithic to medieval: Paleopedological record from Zaraysk Kremlin, CATENA, 2021. V. 196: 104873.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104873
21. Sorokin A.S., Abrosimov K.N., Lebedeva M.P., Kust G.S. Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. № 3. P. 326–337.
https://doi.org/10.1134/S106422931603018
22. Yudina A.V., Romanenko K.A. Mechanistic Understanding of Soil Hierarchical Structure, EGU General Assembly 2019.
https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26167.16809
23. Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Gerke K.M., Korost D.V., Romanenko K.A., Belokhin V.S., Dembovetskii A.V. Tomography in soil science // Bulletin Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2016. V. 86. P. 28–34.
24. Vogel H.-J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections // European J. of Soil Sc. 1997. 48. P. 365–377.
https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x

CALCULATION OF THE NUMBER OF STRUCTURAL CONTACTS IN CLAY DISPERSE SOILS

F. S. Karpenko^{a, #}, K. N. Abrosimov^{b, ##}, and O. V. Serebrova^a

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b *Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevskii per. 7, str. 2, Moscow, 119017 Russia*

[#] *E-mail: kafs08@bk.ru*

^{##} *E-mail: kv2@bk.ru*

The paper considers important issues of calculating the number of structural contacts in clay soils, which is an important physicochemical characteristic of their structure. The studies carried out by the computed X-ray tomography (X-ray mCT) proved the possibility of applying this method not only for analyzing clay microstructure, but also for direct calculation of the number of contacts between mineral particles. The research results permitted us to assess the number of contacts of various predominant types in the clay soil varieties and to obtain empirical dependences between the number of contacts in clays and their particle-size distribution. The obtained data correspond to the models of clay microstructures developed by V.N. Sokolov, i.e., the “bidisperse” model and the model of the “skewing playing card house”.

Keywords: *clay soils, structural contacts, type of contacts, number of contacts, structural composition, mCT, computed tomography*

REFERENCES

1. Abrosimov, K.N., Makeev, A.O., Bagrova, S.M. *Mikrostruktura i porovoe prostranstvo lessovykh otlozhenii nizhnei Volgi* [Microstructure and pore space of loess sediments of the lower Volga]. *Ekologiya i paleoekologiya pochv i paleopochv*. Novosibirsk, Okarina Publ., 2017, pp. 7–12. (in Russian)
2. Amelina, E.A., Shchyukin, E.D. *Izuchenie nekotorykh zakonomernostei formirovaniya kontaktov v poristykh dispersnykh strukturakh* [Study of some regularities of contact formation in porous dispersed structures]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1970, vol. 32, no. 6, pp. 795–800. (in Russian)
3. Babak, V.G. *Prochnost' poristykh tverdykh tel* [Porous solids strength]. Extended abstract of Cand. Sci. (Phys.-Mat.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1970, 20 p. (in Russian)
4. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil plasticity limits]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66–72.
https://doi.org/10.1134/S86978031804004X. (in Russian)
5. Karpenko F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60.
https://doi.org/10.31857/S869-78092019548-60. (in Russian)
6. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay soils]. E.M. Sergeev, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1989, 210 p. (in Russian).
7. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN. 2012, 74 p. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoistva. Sostav, stroeniye i formirovaniye svoistv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian)
9. Rebinder, P.A., Shchyukin, E.D., Margolis, L.Ya. *O mekhanicheskoi prochnosti poristykh dispersnykh tel* [On the mechanical strength of porous dispersed bodies]. *DAN*, 1964, vol. 154, no. 3, pp. 695–698. (in Russian)
10. Sergeev, E.M., Golodkovskaya, G.A., Ziangirov, R.S. and etc. *Gruntovedeniye* [Soil and Rock Engineering].

- Ed. 4. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1983, 386 p. (in Russian)
11. Sokolov, V.N. *Fiziko-khimicheskie aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov* [Physicochemical aspects of the mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
 12. Sokolov, V.N. *Modeli mikrostruktur glinistykh gruntov* [Clay microstructure models]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
 13. Shlykov, V.G. *Rentgenovskii analiz mineral'nogo sostava dispersnykh gruntov* [X-ray analysis of mineral composition of dispersed soils]. Moscow, GEOS Publ., 2006, 176 p. (in Russian)
 14. Abrosimov, K.N., Gerke K.M., Semenov, I.N., Korost, D.V. Otsu's algorithm in the segmentation of pore space in soils based on tomographic data. *Eurasian Soil Science*. 2021, vol. 54, no. 4, pp. 560–571. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040037>
 15. Chiang, Martin Y.M., Landis, F.A., Xianfeng, Wang, Smith, J.R., Cicerone, M.T., Dunkers, J., Luo, Yanfeng. Local thickness and anisotropy approaches to characterize pore size distribution of three-dimensional porous networks. *Tissue Eng. Part C: Methods*. 2009. Pp. 65–76. <http://doi.org/10.1089/ten.tec.2008.0298>
 16. Field, W.G. Towards the statistical definition of a granular mass. Proc. 4th Australia-New Zealand Conf. on Solid Mechanics, 1963, pp. 143–148.
 17. Gray, W.A. The packing of solid particles. Chapman and Yall Ltd. 1968, 236 p.
 18. Lavrukhin, E.V., Gerke, K.M., Romanenko, K.A., Abrosimov, K.N., Karsanina, M.V. Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil xct images based on pore-scale modelling of saturated flow properties. *Soil and Tillage Research.*, 2021, vol. 209, p. 104942.
 19. Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Rummyantseva, N.A. Active porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 951–957.
 20. Romanis, T., Sedov, S., Lev, S., et al. Landscape change and occupation history in the Central Russian Upland from Upper Palaeolithic to Medieval: paleopedological record from Zaraysk Kremlin. *Catena Publ.*, vol. 196, 2021, p. 104873. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104873>.
 21. Sorokin, A.S., Abrosimov, K.N., Lebedeva, M.P., Kust, G.S. Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2016, vol. 49, no. 3, pp. 326–337. <https://doi.org/10.1134/S1064229316030108>
 22. Yudina, A.V., Romanenko, K.A. Mechanistic understanding of soil hierarchical structure. *EGU General Assembly 2019*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26167.16809>
 23. Skvortsova, E.B., Shein, E.V., Abrosimov, K.N., Gerke, K.M., Korost, D.V., Romanenko, K.A., Belokhin, V.S., Dembovetskii, A.V. Tomography in soil science. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2016, vol. 86, pp. 28–34.
 24. Vogel, H.-J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. *European J. of Soil Sc.* 1997. 48, pp. 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x>