

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

М.С. Чернов, В.Н. Соколов, О.В. Разгулина, Р.А. Кузнецов, Л.Г. Денисова

Традиционно в геологической практике для изучения строения образцов дисперсных грунтов применяются, помимо визуального описания, методы оптической и электронной микроскопии. Такие методы позволяют получать информацию о размере, форме и взаимоотношении структурных элементов (частиц, зерен и агрегатов) относительно друг друга. С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) возможно изучать микроскопические детали строения грунтов – характер поверхности песчаных и пылеватых зерен; размер и форму глинистых частиц и их микроагрегатов, характер структурных связей между ними; размер и форму пор в глинистых грунтах; степень ориентации структурных элементов. Однако все эти методы относятся к разрушающим, т.е. для получения информации о строении грунта, необходимо его разрушить – вскрыть массив грунтов, разрезать, расколоть или пересыпать образец грунта.

В последние годы в практику исследования строения грунтов был принят метод рентгеновской компьютерной томографии (КТ) – неразрушающий метод получения объемной модели структуры объекта с использованием рентгеновского излучения. Томография позволяет различать внутри образцов грунтов крупные структурные элементы, такие как макропоры, трещины, различные по плотности и составу участки образца. Особую важность метод представляет при изучении грунтов с неоднородным строением. Метод КТ позволяет изучать представительные образцы без какой-либо предварительной подготовки и с гарантией сохранности его структуры.

В настоящее время постоянно совершенствуются и разрабатываются все более современные сканеры, открывающие возможность анализа структуры с большим разрешением. Для изучения дисперсных грунтов большей информативностью обладают рентгеновские компьютерные микротомографы ( $\mu$ КТ). Диапазон допустимых увеличений  $\mu$ КТ при исследовании структуры грунтов изменяется от нескольких единиц до нескольких сотен раз. Предельное разрешение  $\mu$ КТ может достигать долей мкм.

С помощью  $\mu$ КТ можно исследовать строение любых образцов грунтов: в природном и нарушенном сложении, связных и сыпучих, разной влажности, разного размера и формы и т.д. Однако при подготовке образцов для данного вида исследования необходимо знать и учитывать, влияние геометрических и физических характеристик на качество итогового изображения [1].

В данном докладе описывается применение  $\mu$ КТ Yamato TDM 1000H-II (Япония), полученного в рамках реализации Программы развития МГУ.

Размер образца для исследования в  $\mu$ КТ ограничен техническими возможностями микротомографа, и может варьировать в пределах от 0,1 мм до 5 см в диаметре. При уменьшении области съемки относительно размера образца возрастает количество шума и число различных артефактов при обработке сигнала, что приведет к получению размытого, менее контрастного изображения. Размер образца должен определяться целью исследования, при этом размер интересующих структурных элементов, слагающих образец, должен превышать линейный размер вокселя более чем в 3 раза.

Полученные данные могут быть представлены в виде ортогональных полутоновых сечений ( $\mu$ КТ-изображения), которые можно проводить в любом месте этого объема. Оттенки серого тона на  $\mu$ КТ-изображениях определяются относительным рентгеновским коэффициентом ослабления. При оценке сложной структуры измерение её «рентгеновской плотности» не всегда позволяет с точностью утверждать, какое вещество визуализируется. Обычно можно лишь выделить более плотные (отображаются светлым тоном) и более рыхлые (отображаются темным тоном) участки образца.

С помощью специального программного обеспечения обработки трехмерных изображений возможно построить объемные модели, отражающие структуру образца целиком или пространственное распределение какого-либо структурного компонента. Так, например, граница между поровым пространством и твердыми структурными элементами грунта, определяется оператором, путем установления порогового значения уровня серого. После бинаризации изображения по выбранному уровню серого тона можно проводить качественный анализ объемной структуры порового пространства, а также проводить количественные операции, например, оценивать величину пористости при данном увеличении.

Кроме того, по КТ-изображениям, можно косвенно судить о составе минеральных включений в образцах на основе данных об их морфологии и относительной рентгеновской плотности. Однако для надежной идентификации минеральных разностей необходимо проводить дополнительные исследования о составе грунта.

Использование компьютерной микротомографии (исключительное или в составе комплекса исследований) может быть довольно эффективным при исследованиях структуры грунтов, в том числе, при анализе их порового пространства, при определении соотношения разных структурных элементов и т.д. Кроме того, метод можно использовать для контроля качества и представительности образцов; для оценки наличия скрытых дефектов или неоднородностей, определения пригодности образца для конкретного лабораторного эксперимента и изучения изменения его строения на различных стадиях испытаний.

При изучении строения глинистых грунтов, наиболее эффективным является авторская комплексная методика количественного анализа, основанная на возможности объединения результатов макро- и микроструктурных исследований (по данным РЭМ и  $\mu$ КТ) в единый массив данных и их его анализ с помощью ПО «СТИМАН» [1]. Данная методика была опробована при изучении строения многочисленной коллекции грунтов разного возраста, генезиса и степени литификации, в результате удалось существенно повысить точность исследований структуры порового пространства глинистых грунтов.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00971\_А, 17-05-01045\_А).

#### Список литературы

1. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Чернов М.С., Разгулина О.В., Юрковец Д.И. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп - рентгеновский компьютерный микротомограф (РЭМ- $\mu$ КТ) // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 5. С. 457–463.