

УДК 624.131:552.523

А.Н. Усов¹, М.С. Чернов², В.Н. Соколов³, Е.А. Вознесенский⁴

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРОЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ С УЧЕТОМ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ⁵

Рассмотрено изменение микростроения глинистых грунтов при их деформировании в условиях трехосного сжатия. Предложена комплексная методика для численного описания изменения структурных особенностей глинистых грунтов при их деформировании в условиях трехосного сжатия. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что основные изменения в строении образца происходят в момент возникновения деформационной неустойчивости. К этим изменениям относятся перераспределение порового пространства и выраженная ориентировка структурных элементов грунта. Дальнейшее деформирование грунта не изменяет соотношение количества пор, но при этом ориентировка структурных элементов увеличивается на протяжении всего процесса деформирования.

Ключевые слова: деформирование глинистых грунтов, деформационная неустойчивость, недренированные трехосные испытания, растровая электронная микроскопия, микрофотография, анализ микростроения глинистых грунтов.

The article discusses of the microstructure clay soils transformation during their deformation under triaxial compression conditions. Proposed multifaceted methodology for the numerical description of changes in the structural features of clay soils during deformation under triaxial compression conditions. The research results allow to conclude that major transformation in the structure of the sample develop at the time of deformation instability occurs. These modifications include the redistribution of the pore space and marked orientation of the structural elements of the soil. Further deformation of soil does not change the ratio of the number of pores, but the orientation of the structural elements increases throughout the deformation process.

Key words: deformation of clay soils, deformation instability, undrained triaxial tests, scanning electron microscopy, microtomography, analysis of microstrate clay soils.

Введение. При деформировании грунты, прежде чем перейти в критическое состояние, испытывают состояние деформационной неустойчивости, которое достигается обычно в диапазоне значений относительной деформации 0,5–1,5%. Под деформационной неустойчивостью авторы понимают докритическое состояние грунтов, предшествующее разрушению, которое связано с началом разрыва или ослабления значимого количества межчастичных контактов и сопутствующей перестройкой порового пространства, что проявляется прежде всего в увеличении скорости деформирования грунтов [Усов, Вознесенский, 2016].

Деформационную неустойчивость грунтов изучают в лабораторных условиях с использованием различных схем испытаний и разного испытательного оборудования. Наиболее распространены

испытания в условиях трехосного сжатия. Наша работа основана на результатах испытаний глинистых грунтов в условиях недренированного трехосного сжатия. Для характеристики неустойчивости используется понятие «точка неустойчивости», соответствующее напряженному состоянию грунта в тот момент, после которого рост деформаций значимо ускоряется [Усов, Вознесенский, 2016].

Изучение изменений строения глинистых грунтов, происходящих в процессе деформирования, может помочь в понимании природы деформируемости и прочности грунта. Для этого нами выполнены исследования возможных изменений микростроения глинистых грунтов на разных стадиях их подготовки и нагружения в условиях трехосного сжатия. Эти изменения фиксировались численно с помощью количественного анализа

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, науч. с.; *e-mail:* alexeyusov@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* chernov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, профессор, зав. лабораторией, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* sokolov@geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, профессор, зав. лаб., докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* chernov@geol.msu.ru

⁵ Исследования выполнены за счет грантов РФФИ (проекты №13-05-01048-а «Закономерности деформирования дисперсных грунтов в диапазоне малых деформаций» и № 16-05-00971-А «Комплексное изучение макро- и микростроения, как основа для прогноза прочности и деформируемости поведения глинистых грунтов»). Работа выполнена на оборудовании, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

результатов растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (μКТ). Подобное сочетание методов позволяет изучить строение глинистого образца как на макро- и мезоуровне, так и на микроуровне. Наблюдения за изменениями строения образцов проводились в следующие ключевые моменты подготовки и испытания образцов: 1) окончание предварительной изотропной консолидации; 2) в момент достижения деформационной неустойчивости; 3) после разрушения образца.

Характеристика исследованных грунтов. Объект исследования — модельные глинистые грунты, образцы которых можно считать идентичными, так как процедура их подготовки была абсолютно одинаковой. Исходным материалом для формирования таких образцов были плавунные голоценовые глины ледниково-морского генезиса, отобранные в районе г. Тронхейм (Норвегия) из толщи Тиллер. Предварительная подготовка каждого образца включала в себя растирание исходного материала, замешивание его до однородной массы при влажности верхнего предела пластичности, консолидацию в условиях одноосного сжатия без возможности бокового расширения под вакуумом в консолидаторе при осевой нагрузке 200 кПа и последующую изотропную консолидацию в стабилометре при всесторонней нагрузке 400 кПа до условной стабилизации объемной деформации.

Методика исследований. Чтобы оценить изменение микростроения модельных глинистых грунтов в процессе деформирования, выполнена серия исследований, которая включала в себя изучение строения образца после изотропной консолидации, в точке неустойчивости и по-

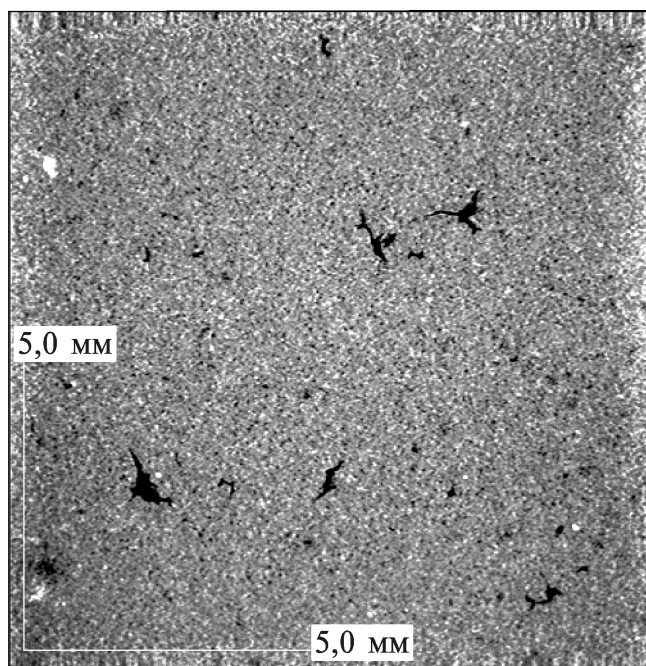


Рис. 1. μКТ-фото участка из центральной части модельного глинистого образца после изотропной консолидации при увеличении 8 (черное соответствует порам)

сле разрушения. Для этого было подготовлено 3 одинаковых образца и проведено 3 испытания, каждый из которых заканчивался разрушением в недренированных условиях. После завершения соответствующей стадии испытания образца из его центральной части вырезали пробу в виде кубика с гранью 2 см и параллелепипеда с основанием 0,5 см и высотой 2 см. Обе пробы тут же парафинировали для исключения потери влаги.

Отобранные пробы исследованы на микротомографе «Yamato TDM1000» (Япония) при увеличении от 8 до 125. В результате получены наборы полутоновых изображений в различных сечениях, которые можно рассматривать и анализировать в трехмерном изображении с помощью специализированного программного обеспечения.

На рис. 1 приведен пример микротомографического изображения образца после изотропной консолидации, где отчетливо видно, что даже после стабилизации объемных деформаций в центральной части образца остаются крупные анизометрические поры. Размер этих пор достигает 1,5 мм в поперечнике.

После завершения исследований в компьютерном микротомографе пробы образцов были изучены в РЭМ «LEO 1450VP» (Германия). Образцы анализировались при увеличении от 250 до 32 000. Пример полученного изображения приведен на рис. 2.

Существует много вариантов программного обеспечения (ПО) для количественной оценки цифровых изображений. Авторы исследования использовали ПО СТИМАН, так как оно позволяет объединять разномасштабные структурные характеристики, полученные с помощью РЭМ и μКТ, и проводить количественный анализ структуры по суммарному массиву данных [Булыгина и др., 2014]. В результате количественный анализ проводился по серии РЭМ- и μКТ-изображений при разном увеличении, которое меняли в геометрической прогрессии с коэффициентом 2 (от x8

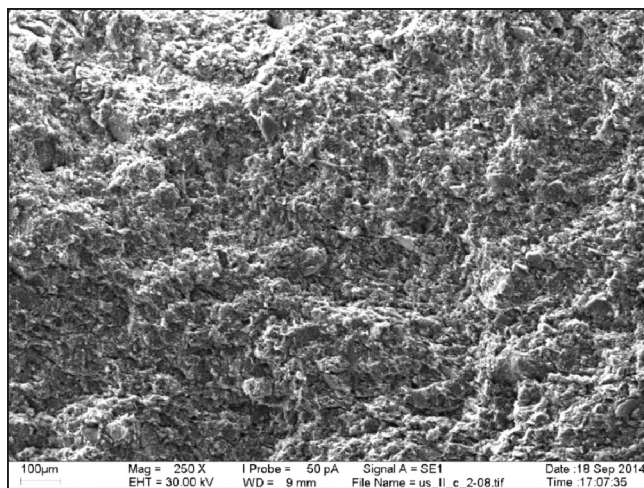


Рис. 2. Пример фото, полученного с помощью РЭМ, из центральной части образца после изотропной консолидации при увеличении 250

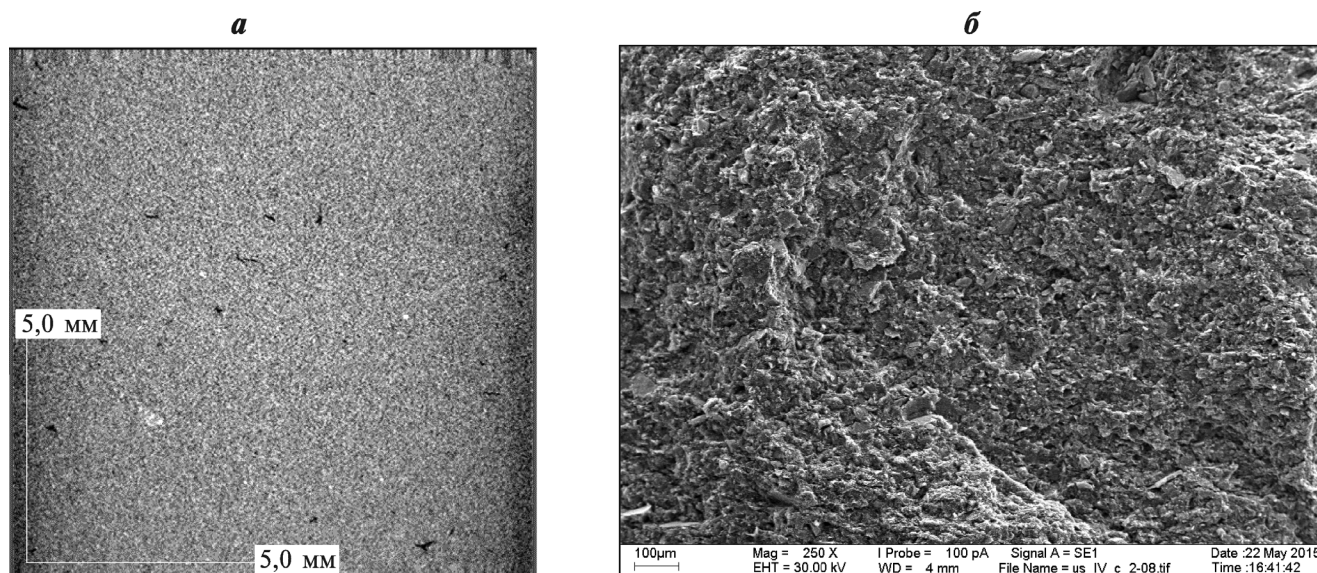


Рис. 3. Фото глинистого образца в момент достижения деформационной неустойчивости, полученные по результатам: *a* — микрофотографии, *б* — растровой электронной микроскопии

до $\times 32\,000$), таким образом в ходе исследования были получены количественные данные о строении образца, учитывающие его макро- и микро-структурные элементы.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ серии разномасштабных изображений, полученных с помощью РЭМ и μ КТ (увеличение от 8 до 32 000), в специализированной программе СТИМАН позволил получить численные характеристики микростроения изученных глинистых образцов.

На рис. 3 приведены изображения образца, полученные в момент достижения деформационной неустойчивости, по результатам микрофотографии (рис. 3,*a*) и растровой электронной микроскопии (рис. 3,*б*) соответственно, на нем видно, что крупных макропор в образце нет и строение стало более однородным.

Важно отметить, что разрушение образца носило пластический характер, без образования поверхности смещения. После разрушения образец принимает форму «бочки» и пробы для изучения микростроения вырезают из его центральной части. Качественный визуальный анализ изображений, полученных после разрушения образца (рис. 4), показывает, что образец стал еще однороднее и увеличилась ориентированность структурных элементов.

Среди результатов совместной количественной обработки данных РЭМ и μ КТ наиболее интересны, по нашему мнению, сведения о распределении пор по размерам и роза-диаграмма ориентировки структурных элементов. Главное преимущество комплексного анализа данных о строении образцов — возможность анализировать не только микропоры, но и макропоры, включая крупные.

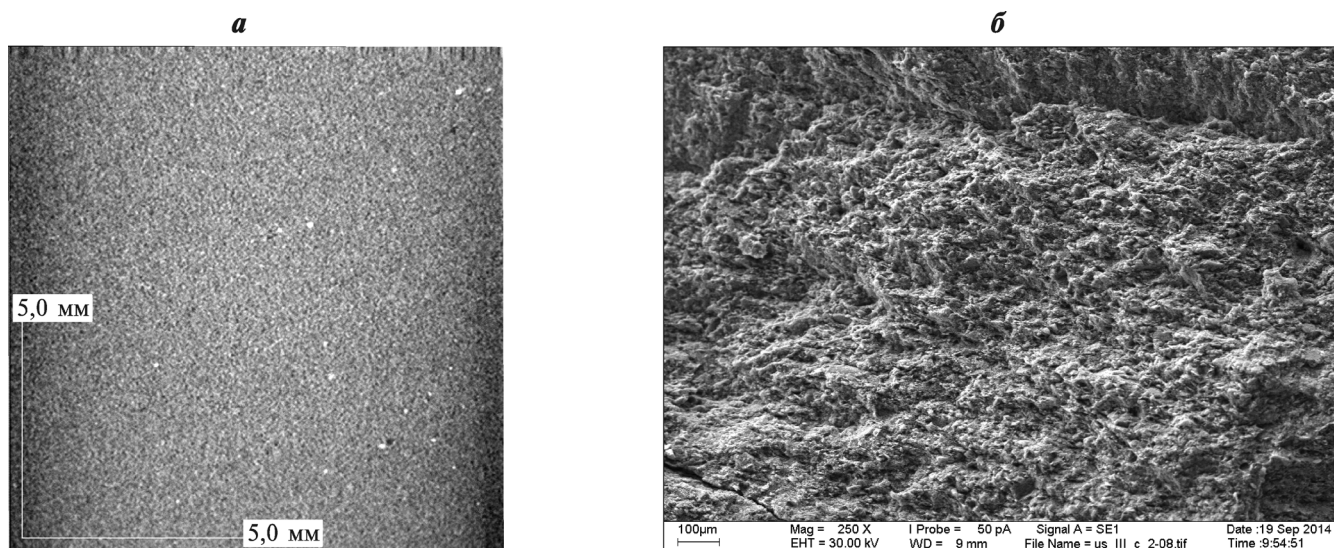


Рис. 4. Фото глинистого образца после разрушения, полученные по результатам: *a* — микрофотографии, *б* — растровой электронной микроскопии

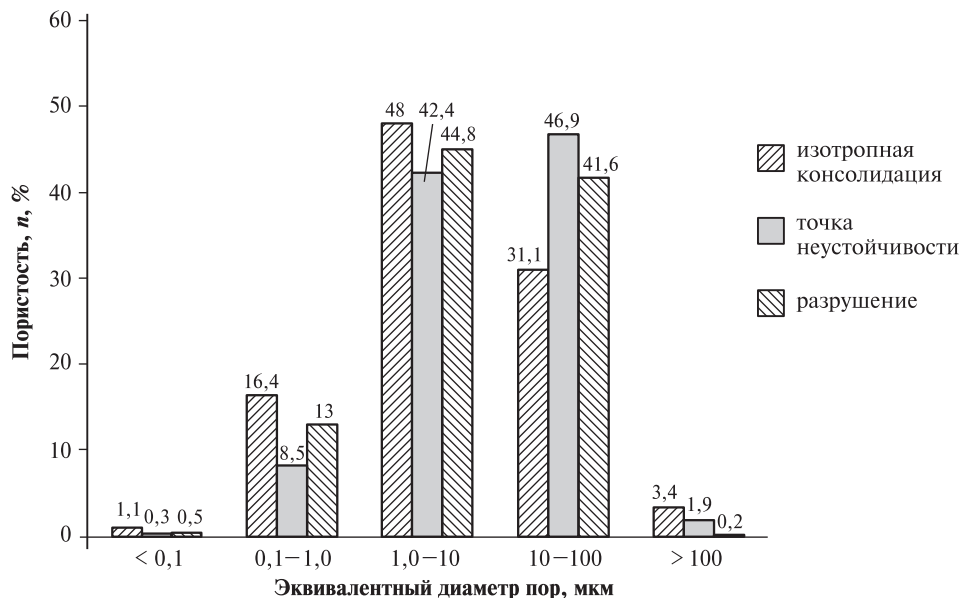


Рис. 5. Диаграмма вклада пор различных категорий в общую пористость на разных этапах деформирования

Итоговая диаграмма распределения пор по размерам на разных этапах деформирования приведена на рис. 5.

Анализ результатов исследований изменения строения образцов модельных глинистых грунтов по описанной выше методике показал, что в процессе деформирования грунта происходит перераспределение разных категорий пор в его поровом пространстве. К моменту возникновения деформационной неустойчивости уже происходят следующие изменения в строении глинистых грунтов:

- существенно увеличивается количество крупных межмикроагрегатных микропор ($10-100$ мкм),

- существенно снижается количество внутри-микроагрегатных микропор ($0,1-1,0$ мкм),

- кроме размеров пор также меняется ориентировка структурных элементов грунта, что иллюстрируют розы-диаграммы ориентировки частиц, приведенные на рис. 6.

Роза-диаграмма ориентировки структурных элементов визуально отражает показатели геометрических признаков. По существу, она отображает распределение локального градиента интенсивности сигнала по двум направлениям: $dI-dx$ и $dI-dy$ [Осипов и др., 1989].

Направление преимущественной ориентировки определяется по нормали к направлению максимального градиента интенсивности сиг-

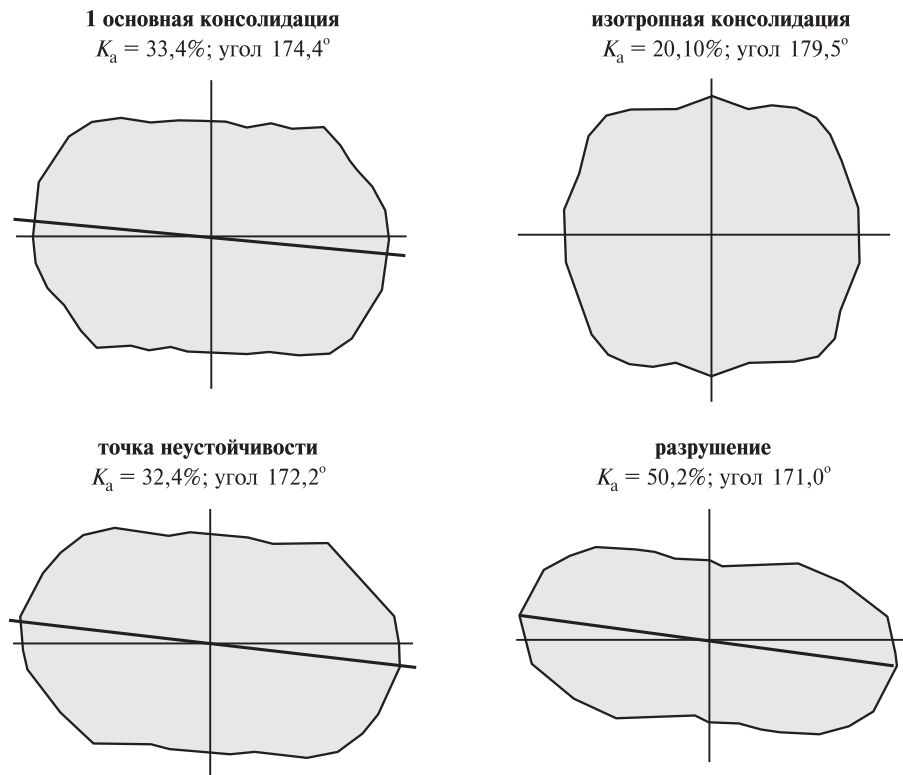


Рис. 6. Розы-диаграммы ориентировки структурных элементов глинистого грунта на разных этапах деформирования

нала, причем направление максимальной оси соответствует преимущественному направлению ориентировки структурных элементов в плоскости изображения [Осипов и др., 1989].

По полученной розе-диаграмме ориентировки можно рассчитать параметр степени ориентировки — коэффициент анизотропии K_a :

$$K_a = \left(1 - \frac{S_1 + S_1'}{S_2 + S_2'} \right) \cdot 100\%,$$

где $S_1 + S_1'$ и $S_2 + S_2'$ — суммарные площади радиальных сегментов вдоль минимальной и максимальной осей розы-диаграммы ориентировки соответственно [Осипов и др., 1989].

При анализе рис. 6 видно, что основные изменения ориентировки структурных элементов происходят на этапе между изотропной консолидацией и точкой неустойчивости. Численные характеристики ориентировки — коэффициент анизотропии и угол — подтверждают это. После прохода через момент деформационной неустойчивости угол наклона структурных элементов практически не меняется, а коэффициент анизотропии лишь увеличивается. Увеличение коэффициента анизотропии объясняется возрастанием осевой нагрузки в процессе деформирования и как следствие увеличением анизотропии (вытянутости) структурных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Чернов М.С. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп–рентгеновский компьютерный микромограф (РЭМ-μКТ) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 5. С. 457–463.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микро-структура глинистых пород. М.: Недра, 1989.

Полученные результаты показывают, что к моменту возникновения деформационной неустойчивости уже произошли основные изменения строения глинистых грунтов, т.е. существенно увеличилось количество крупных микропор (10–100 мкм) и возникла выраженная ориентировка структурных элементов грунта. При последующем деформировании, вплоть до разрушения, соотношение количества пор не меняется, при этом ориентировка структурных элементов возрастает на протяжении всего процесса деформирования.

Выводы. 1. Описана новая методика получения корректной информации об изменениях строения модельных глинистых грунтов при деформировании, которая включает исследование строения грунтов комплексом РЭМ-μКТ на разных масштабных уровнях [Булыгина и др., 2014], а также представлены первые результаты ее реализации.

2. К моменту возникновения деформационной неустойчивости уже происходят основные изменения строения глинистых грунтов: существенно увеличивается количество крупных микропор (10–100 мкм) и возникает выраженная ориентировка структурных элементов грунта. При последующем деформировании, вплоть до разрушения, соотношение количества пор не меняется, при этом ориентировка структурных элементов увеличивается на протяжении всего процесса деформирования.

Усов А.Н., Вознесенский Е.А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // Инженерная геология. 2016. № 2. С. 42–49.

Поступила в редакцию
29.03.2017