

# ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-12-19>

УДК 624.131



Восточно-Паужетское термальное поле. Фото М.С. Чернова

## КУЗНЕЦОВ Р.А.\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия, [kuznetsov@geol.msu.ru](mailto:kuznetsov@geol.msu.ru)  
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

## ЧЕРНОВ М.С.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия, [chernov@geol.msu.ru](mailto:chernov@geol.msu.ru)

## СОКОЛОВ В.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия, [sokolov@geol.msu.ru](mailto:sokolov@geol.msu.ru)

## РАЗГУЛИНА О.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия, [ol.razgulina@yandex.ru](mailto:ol.razgulina@yandex.ru)

## ЮРКОВЕЦ Д.И.

ООО «Токио Бозки (РУС)», г. Москва, Россия,  
[dmitry.yurkovets@tokyo-boeki.ru](mailto:dmitry.yurkovets@tokyo-boeki.ru)  
Адрес: ул. Новолесная, д. 2, г. Москва, 127055, Россия

## Аннотация

Для описания изменения строения гидротермальных глинистых грунтов в ходе компрессионных испытаний была проведена количественная оценка характеристик порового пространства. Для исследований применялась методика, совмещающая данные растровой электронной микроскопии (РЭМ) и компьютерной рентгеновской микротомографии. Совместное использование результатов анализа изображений, полученных при помощи РЭМ и томографии, позволяет дать количественную оценку параметров распределения структурных элементов в диапазоне размеров от долей микрометра до нескольких миллиметров. В качестве объекта исследования были выбраны гидротермальные глинистые грунты, отобранные из шурфа, пройденного в пределах Восточно-Паужетского геотермального поля (юг п-ва Камчатка). Все изученные образцы характеризуются высокими значениями пористости и влажности. Кроме того, им свойственно весьма неоднородное строение, обусловленное особенностями формирования. В результате количественного анализа микростроения установлено, что в исследуемых грунтах преобладают мелкие межмикроагрегатные, межзернистые, межмикроагрегатно-зернистые микропоры, эквивалентный диаметр которых изменяется от 1 до 10 мкм. При этом существенное значение имеет наличие макропор с эквивалентным диаметром более 100 мкм, поскольку деформирование образца происходит, в первую очередь, за счет макропор и мелких межмикроагрегатных микропор. Анализ интегральных параметров микроструктуры (дисперсности и анизотропии), рассчитанных по электронно-микроскопическим изображениям при тысячекратном увеличении, для образцов естественного сложения и образцов, подвергшихся компрессионным испытаниям, не позволил выявить закономерности их изменения в результате испытаний. Этот факт объясняется особенностями условий формирования исследуемых грунтов — унаследованными неоднородностями за счет псевдоморфного замещения глинистыми минералами структурных элементов исходных вулканогенных пород. Размер, форма и ориентация в пространстве агрегатов глинистых частиц определяются структурой исходной породы и непосредственно гидротермальными преобразованиями.

## Ключевые слова:

гидротермальные глинистые грунты; компрессионные испытания; деформационные свойства; растровая электронная микроскопия; компьютерная рентгеновская томография; количественный анализ; пористость

## Ссылка для цитирования:

Кузнецов Р.А., Чернов М.С., Соколов В.Н., Разгулина О.В., Юрковец Д.И., 2018. Изменение строения гидротермальных глинистых грунтов при компрессионных испытаниях. Инженерная геология, Том XIII, № 4–5, с. 12–19, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-12-19>

# STRUCTURAL CHANGES OF HYDROTHERMAL CLAY SOLIS DURING COMPRESSION TESTS

**RUSLAN A. KUZNETSOV\***

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
kuznetsov@geol.msu.ru  
Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia*

**MIKHAIL S. CHERNOV**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
chernov@geol.msu.ru*

**VYACHESLAV N. SOKOLOV**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
sokolov@geol.msu.ru*

**OLGA V. RAZGULINA**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
ol.razgulina@yandex.ru*

**DMITRIY I. URKOVETS**

*"Tokyo Boeki (RUS)" LLC, Moscow, Russia, dmitry.yurkovets@tokyo-boeki.ru  
Address: Bld. 2, Novolesnaya St., 127055, Moscow, Russia*

## Abstract

To describe the change in the structure of hydrothermal clay soils during the compression tests, a quantitative assessment of the pore space characteristics was carried out. A technique combining the data of scanning electron microscopy (SEM) and computer X-ray microtomography was used for the studies. The joint use of the results of image analysis obtained with the help of SEM and tomography makes it possible to quantify the distribution parameters of structural elements in the size range from fractions of a micron to several millimeters. As an object of research, hydrothermal clays were taken from the pit that was passed within the Vostochno-Pauzhetskoye geothermal field (south of Kamchatka Peninsula). All studied samples are characterized by high values of porosity and humidity. As a result of a quantitative analyses of microstructure it is revealed that in the investigated soils predominate small intermicroaggregate, intergranular, inter-microaggregate-granular micropores with equivalent diameter from 1 to 10  $\mu\text{m}$ . In this case, the presence of macropores with an equivalent diameter of more than 100  $\mu\text{m}$  is of great importance, since the deformation of the sample occurs primarily due to macropores and small intermicroaggregate micropores. Analysis of the integral parameters of the microstructure (dispersion and anisotropy) were calculated from electron microscopic images obtained by a thousandfold magnification for specimens of the natural state and for specimens after compression tests. Patterns in the change of these parameters as a result of compression tests were not revealed. This fact is explained by the peculiarities of the formation conditions of the investigated soils — the inherited heterogeneities due to the pseudomorphic replacement of the structural elements of the initial volcanogenic rocks by clay minerals. The size, shape and orientation in the space of aggregates of clay particles are determined by the structure of the initial rock and directly by hydrothermal transformations.

## Key words:

hydrothermal clay-soils; compression test; deformation properties; scanning electron microscopy; computer X-ray tomography; quantitative analysis; porosity

## For citation:

Kuznetsov R.A., Chernov M.S., Sokolov V.N., Razgulina O.V., Urkovets D.I., 2018. Structural changes of hydrothermal clay soils during compression tests. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 4–5, pp. 12–19, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-12-19>

## Введение

Для понимания природы деформационных свойств глинистых грунтов существенное значение имеет их строение и его изменение при деформировании. Вопросы исследования и количественного анализа строения грунтов, а также изменения строения при деформировании изучались рядом авторов: А.Я. Туровской [8], В.С. Фадеевой [9], Н.Я. Денисовым [3], Р.С. Зиангировым [4], В.И. Осиповым [5, 6], М.Е. Houben [14, 15], Suksun Horpibulsuk [16], Amer Deiricha [13], Adnan Sufiana [11], Alaoui [12]. Большинство из них, оценивая изменение строения, рассматривало в основном переориентацию частиц и агрегатов в образце под действием нагрузки.

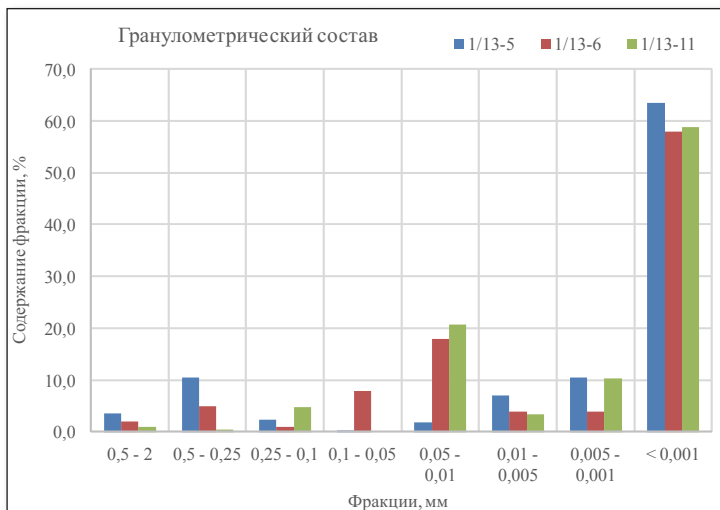
Цель настоящей работы — исследование изменения строения гидротермальных глинистых грунтов в ходе компрессионных испытаний с использованием методики

совмещения растровой электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии.

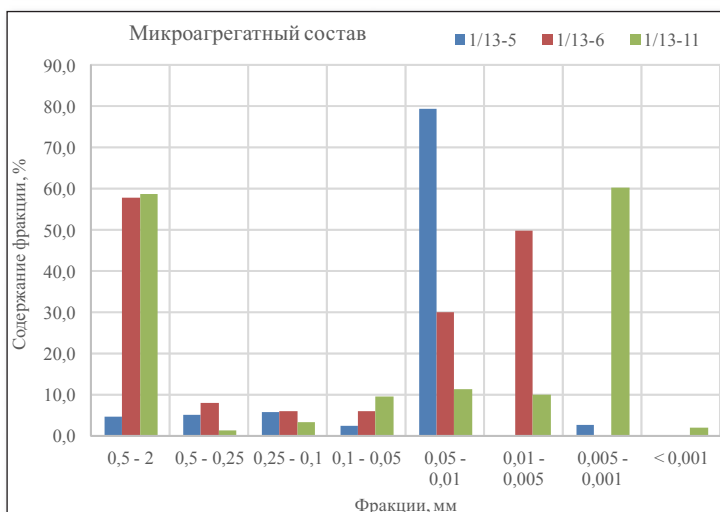
Следует отметить, что физико-механические свойства высокодисперсных грунтов во многом определяются структурными связями, формирующимися на контактах твердых частиц [5]. Кроме того, числом и типом этих контактов определяется структура порового пространства грунтов, поэтому характеристики последнего имеют существенное значение для понимания природы свойств таких грунтов. Причем важную роль будут играть как значение общей пористости, так и размер, форма и распределение пор в объеме грунта. Для получения количественной оценки параметров порового пространства использовался программный пакет «СТИМАН» [1, 2, 7]. Поскольку для выбранных грунтов характерны неоднородности в широком диапазоне размеров, для количественного анализа строения использовались изображе-

**Минеральный состав образцов**  
Mineral composition of samples

Образец	Содержание минералов, %					
	кварц	пирит	анатаз	каолинит	смектит	гетит
1/13-5	0	5	1	67	25	2
1/13-6	41	4	0	53	0	2
1/13-11	25	1	1	71	0	2



**Рис. 1. Гранулометрический состав исследуемых образцов**  
Fig. 1. Granulometric composition of the studied samples



**Рис. 2. Микроагрегатный состав исследуемых образцов**  
Fig. 2. Microaggregate composition of the studied samples

ния, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) и рентгеновского компьютерного микротомографа (μКТ) при увеличениях от 16 до 32 000 раз.

**Объект исследования**

Гидротермальные глинистые грунты — первый от поверхности глинистый горизонт, мощность которого не превышает первых метров, формирующийся в результате гидротермальной переработки вулканогенных пород и

развитый в пределах термальных полей — мест естественной разгрузки гидротермальных систем в районах современного вулканизма.

Процесс формирования микроструктур гидротермальных глинистых грунтов во многом определяется устойчивостью минералов к гидротермальному преобразованию. Вначале преобразуется вулканическое стекло, затем разрушается плагиоклаз и рудные минералы. Замещение минералов материнской породы новообразованными глинистыми минералами происходит псевдоморфно. Поэтому в глинистой матрице присутствуют множественные включения и скопления псевдоморфоз глинистых частиц по глобулам вулканического стекла и по вытянутым микрокристаллам плагиоклазов. В настоящее время процесс гидротермальной переработки продолжается, и в исследуемых гидротермальных грунтах наряду с участками микроструктур, в которых между структурными элементами преобладают ближние коагуляционные контакты, сохраняются многочисленные участки глинистой матрицы и псевдоморфоз по зернам первичных минералов, между которыми преобладают фазовые контакты кристаллизационного типа [10].

В качестве объекта исследования были выбраны гидротермальные глинистые грунты, отобранные из шурфа ВПП-1/13, пройденного в пределах Восточно-Паужетского термального поля (юг п-ва Камчатка). Строение изучалось на примере трех образцов: 1/13-5, 1/13-6 и 1/13-11, отобранных с глубин 1,1 м, 1,35 м и 2,45 м соответственно.

Для выбранных образцов характерно высокое содержание глинистых минералов (табл. 1): 53% для 1/13-6, 71% для 1/13-11 и 92% для 1/13-5. При этом в образцах 1/13-6 и 1/13-11 глинистые минералы представлены каолинитом, а образец 1/13-5 также содержит 25% смектита. Неглинистые минералы представлены в образцах 1/13-6 и 1/13-11 преимущественно кварцем, отсутствующим в 1/13-5. В составе всех образцов содержатся первые проценты пирита, гетита и анатаза.

Для всех образцов характерны достаточно высокие значения природной влажности (62–81%). Кроме того, они имеют высокие значения верхнего и нижнего пределов пластичности (63–84 и 33–54% соответственно) и числа пластичности (от 22 до 30%). В гранулометрическом составе преобладает глинистая фракция, содержание которой для каждого из образцов составляет не менее 55 % (рис. 1), в то время как по результатам микроагрегатного анализа образцы на 80% сложены агрегатами и частицами размером 0,005–0,1 мм (рис. 2). Согласно классификации, предложенной в ГОСТ 25100–2011

«Грунты. Классификация», образцы 1/13-5 и 1/13-11 можно охарактеризовать как глины тяжелые, а 1/13-6 — как глину легкую пылеватую. Для исследованных грунтов установлены высокие значения пористости — от 62 до 67%. Образцы в естественном сложении характеризуются следующими консистенциями: 1/13-5 — от полутвердой до тугопластичной, 1/13-6 — от тугопластичной до мягкопластичной, 1/13-11 — мягкопластичной.

Исследуемые грунты обладают следующими показателями прочностных и деформационных свойств. Прочность образцов на одноосное сжатие меняется от 0,093 до 0,176 МПа, сцепление — от 17 до 25 кПа; при этом угол внутреннего трения варьирует в широких пределах: от 4 до 19 градусов. В диапазоне нагрузок 0,1–0,15 МПа все исследованные грунты имеют модуль деформации менее 5 МПа (от 0,66 до 1,6 МПа) и, согласно ГОСТ-25100-2011 «Грунты. Классификация», являются очень сильно деформируемыми.

### Методика исследования

Компрессионные испытания проводились в приборе АСИС. Поскольку грунты были сформированы в приповерхностных условиях и не испытывали высоких давлений, использовались небольшие нагрузки: 0,025; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 и 0,25 МПа. При этом на каждой ступени проводилась консолидация, критерием завершения которой была деформация, не превышающая 0,01 мм за 16 часов. Для изучения строения грунтов из одного монолита вырезались образец для получения трехмерной реконструкции при помощи рентгеновского компьютерного микротомографа, образец для исследований с помощью растрового электронного микроскопа и кольцо для проведения компрессионных испытаний.

Комплексный анализ данных РЭМ и  $\mu$ КТ выполнялся по следующей методике. После получения трехмерной реконструкции из образца вырезался участок меньших размеров для дальнейшего изучения в РЭМ. Микротомография была реализована с помощью прибора Yamato TDM 1000H-II. По трехмерной реконструкции, полученной при 16-кратном увеличении, оценивалось содержание пор, эквивалентный диаметр которых не менее 100 мкм (рис. 3). Для этого использовался программный комплекс VGStudio MAX 2.2. Для получения РЭМ-изображений применялся прибор LEO 1450VP. Количественный анализ содержания пор, эквивалентный диаметр которых не превышает 100 мкм, производился в программном пакете «СТИМАН» по сериям из девяти изображений при разных увеличениях (рис. 4), меняющихся в геометрической прогрессии с коэффициентом 2 (от 125 до 32 000). Результатом такого количественного анализа является распределение пор по размерам, на основании которого принято выделять категории пор в соответствии с их эквивалентным диаметром [6]: межчастичные ультрамикропоры ( $< 0,1$  мкм), межмикроагрегатные тонкие микропоры (0,1–1 мкм), межмикроагрегатные, межзернистые, межмикроагрегатно-зернистые микропоры мелкие (1–10 мкм) и крупные ( $> 10$  мкм). При этом для получения объемной доли пор определенной категории от общего объема образца грунта пересчет осуществлялся с использованием значения общей пористости, полученного стандартным лабораторным методом. Подобным же образом проводилась оценка пористости для образцов, подвергшихся компрессионным испытаниям.

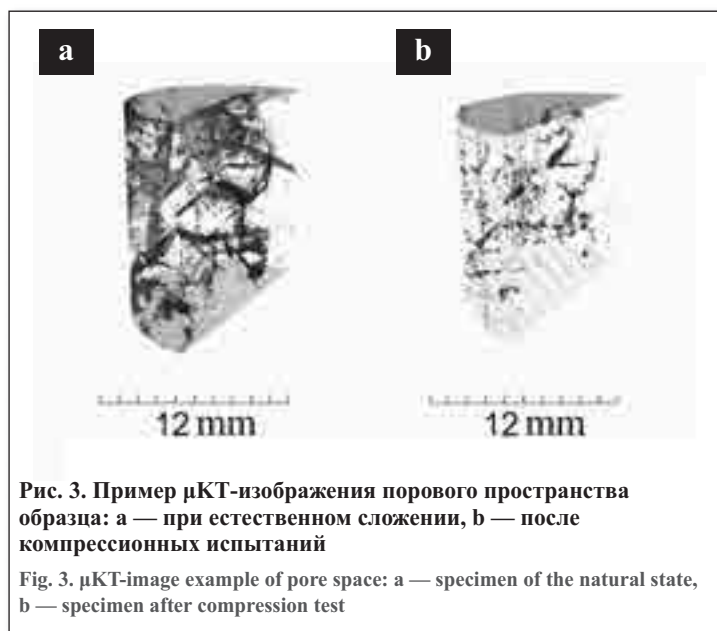


Рис. 3. Пример  $\mu$ КТ-изображения порового пространства образца: а — при естественном сложении, б — после компрессионных испытаний

Fig. 3.  $\mu$ KT-image example of pore space: a — specimen of the natural state, b — specimen after compression test

Таким образом, сопоставляя содержание пор различных категорий до и после испытания образца, возможно оценить вклад каждой категории пор в деформирование и определить размер структурных элементов, наиболее подверженных деформациям при компрессии.

Интегральные характеристики структуры, рассчитываемые по результатам количественного анализа, оценивались по двум параметрам — дисперсности  $D$  и анизотропии  $A$ . Физический смысл параметра  $D$  заключается в интегральной оценке степени крупности структурных элементов. Для увеличения в 1000 раз показатель  $D$  будет характеризовать отношение числа структурных элементов (пор и частиц) с размерами более 10 мкм к числу структурных элементов с размерами менее 5 мкм [6]. Параметр  $A$ , как и параметр  $D$ , рассчитывается при помощи спектров Фурье для изображений и отражает степень ориентированности структурных элементов на этом изображении. Коэффициент анизотропии  $K_a$  характеризует соотношение числа структурных элементов, ориентированных вдоль преобладающего направления ориентации на изображении, и числа структурных элементов, ориентированных вдоль направления, параллельно которому ориентировано наименьшее их количество [6].

Значения интегральных характеристик были получены как среднее значение таких параметров, определявшихся для нескольких изображений, полученных при тысячекратном увеличении.

### Результаты и их обсуждение

Обработка изображений, полученных при помощи растровой электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии, позволила провести количественный анализ порового пространства исследуемых образцов, результаты которого представлены в табл. 2.

По результатам проведенного количественного анализа можно сказать, что в исследуемых грунтах преобладают мелкие межмикроагрегатные, межзернистые, межмикроагрегатно-зернистые микропоры, эквивалентный диаметр которых от 1 до 10 мкм. Несмотря на преобладание пор этой категории, деформирование образца происходит, в первую очередь, за счет макропор с эквива-

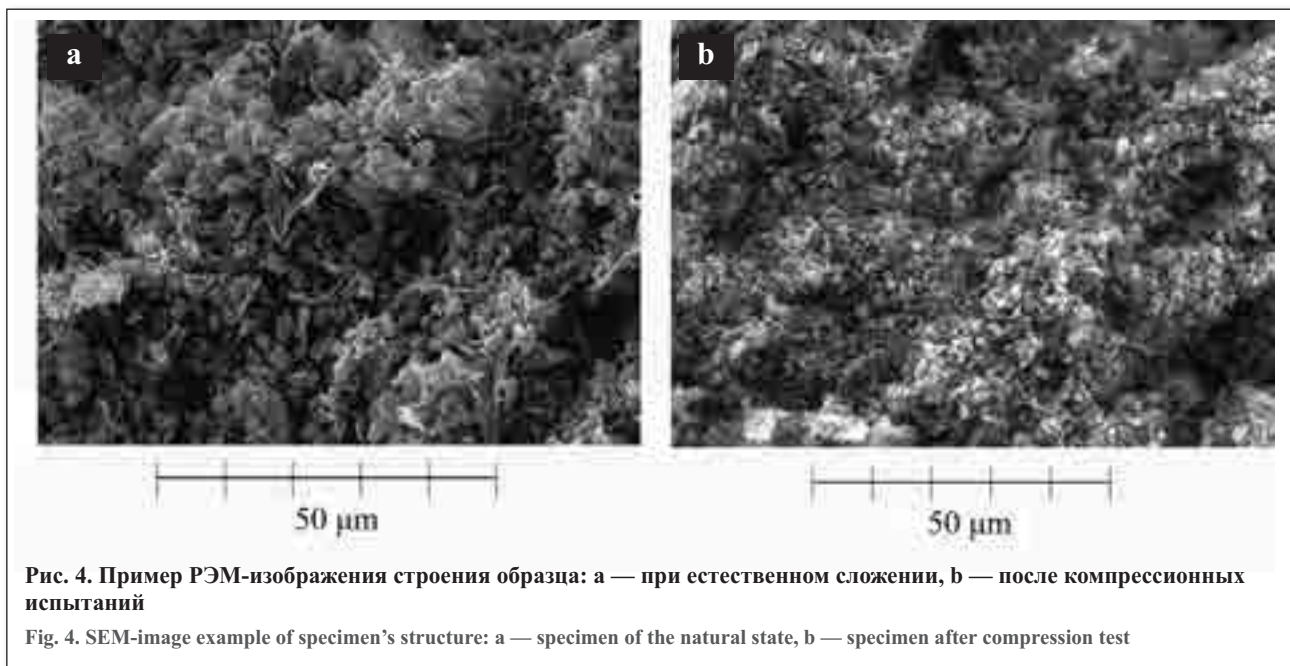


Таблица 2  
Table 2

**Содержание пор различных категорий и интегральные параметры микроструктуры в образцах грунта естественного сложения и после компрессионных испытаний**  
**Content of pores of different categories and the integral parameters of the microstructure in clay samples of natural state and after compression tests**

Номер образца	Сложение образца	Содержание пор различных категорий, %							
		< 0,1 мкм	0,1–1,0 мкм	1,0–10 мкм	10–100 мкм	> 100 мкм	A	D	K <sub>a</sub> , %
1/13-11	естественное	1,4	16,6	28,5	12,5	7,5	1,203	0,667	13,00
	после компрессии	1,6	15,5	20	14,2	1,6	1,047	0,933	10,18
1/13-5	естественное	0,8	11,3	27,9	19,1	8,2	1,150	0,887	12,17
	после компрессии	0,9	14,2	20,8	22,5	0,1	1,201	1,021	17,39
1/13-6	естественное	0,5	13,6	31,9	14,9	9	1,064	0,603	5,78
	после компрессии	1,3	13,5	25,2	15,5	3	1,177	0,782	11,59

Примечания: A — интегральный параметр анизотропии, D — интегральный параметр дисперсности, K<sub>a</sub> — коэффициент анизотропии.

лентным диаметром более 100 мкм и мелких межмикроагрегатных микропор. Примечательно, что содержание крупных межмикроагрегатных микропор для каждого из образцов увеличивается после компрессионных испытаний. Это обусловлено, во-первых, тем, что часть макропор уменьшается и переходит в категорию крупных микропор, во-вторых, тем, что некоторые мелкие микропоры в результате деформирования объединяются, образуя крупные микропоры. Последнее может быть обусловлено присутствием в гидротермальных глинистых грунтах блоков, обладающих различной прочностью структурных связей.

Диаграмма, отражающая вклад пор различных категорий в общую пористость образцов естественного строения и образцов после компрессионных испытаний, приведена на рис. 5.

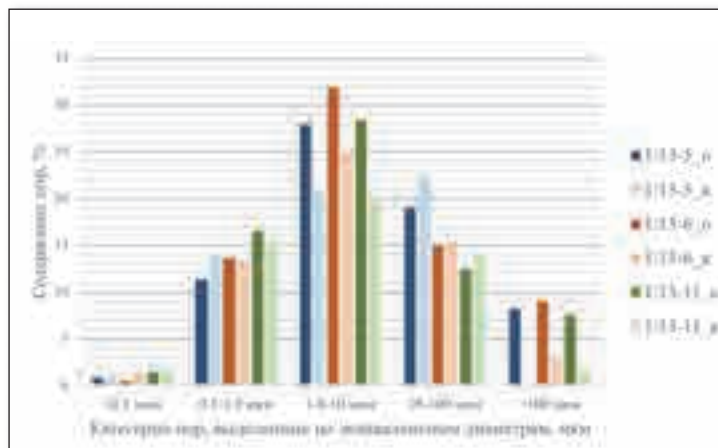
Для всех образцов характерно возрастание интегрального параметра дисперсности в результате компрессионных испытаний, что объясняется формированием в ходе испытаний агрегатов большего размера. Интегральный параметр анизотропии и коэффициент анизотропии у образцов 1/13-5 и 1/13-6 возрастают в результате компрессии, тогда как образцу 1/13-11 свойственно их уменьшение. Такой неоднозначный результат может быть объяснен, во-первых, исходным строением исследуемых грунтов, а во-вторых, методикой проведения количественного анализа, учитывающей лишь преобладающее направление ориентации структурных элементов, но не угол между этим направлением и направлением действия нагрузки в ходе компрессии. Условия залегания исходных пород и процессы, в результате которых формируются исследуемые грунты, обуславливают их строение, на ко-

торое существенно меньше оказывает влияние современное их залегание. Поэтому преобладающим направлением ориентации структурных элементов в грунте естественного сложения может быть даже субвертикальное. Поскольку в ходе компрессионных испытаний структурные элементы грунта стремятся принять ориентацию, перпендикулярную действующей нагрузке, преобладающее направление ориентации по окончании испытания может быть приближено к горизонтальному. Таким образом, в ходе испытаний может измениться преобладающее направление ориентации, при том что степень ориентации параллельно новому преобладающему направлению может оказаться меньше. В связи с тем, что коэффициент анизотропии непосредственно зависит от того, какое направление ориентации является преобладающим, изменения этого коэффициента в результате компрессии могут быть различными. Такой характер изменения строения подтверждает результаты исследований, полученных Р.С. Зиангировым для каолиновых паст с различной начальной ориентацией частиц [4].

Анализируя изменение содержания пор различных категорий при деформировании гидротермальных глинистых грунтов, помимо количественной оценки изменений порового пространства, можно сделать вывод и о размере твердых структурных элементов, в большей степени подверженных деформированию в выбранном диапазоне нагрузок. По результатам проведенных исследований можно сказать, что наибольший вклад в общую деформацию образца вносят структурные элементы, чей эквивалентный диаметр меняется от 10 до 100 мкм. То есть это агрегаты и «блоки» глинистого вещества, а также включения неглинистых минералов, образующие межагрегатные поры. Поскольку исследуемые грунты являются молодыми образованиями, залегающими в приповерхностной зоне и не испытывавшими высоких давлений в ходе своей геологической истории, можно также говорить о заметном вкладе в процесс деформации межмикроагрегатных пор, эквивалентный диаметр которых, согласно результатам исследований В.И. Осипова, В.Н. Соколова и Н.А. Румянцевой [6], для таких грунтов может достигать 15 мкм.

## Заключение

Результаты исследования порового пространства гидротермальных глинистых грунтов в ходе компрессионных испытаний с использованием предложенной методики совмещения методов растровой электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии позволили количественно оценить изменение таких параметров порового пространства, как общая пористость, распределением пор по категориям, вклад каждой категории



**Рис. 5. Диаграмма вклада пор различных категорий в общую пористость образцов до и после компрессионных испытаний (индекс «о» соответствует образцам естественного сложения, индекс «к» — образцам после компрессионных испытаний)**

Fig. 5. A diagram of the contribution of pores of various categories to the total porosity of the samples before and after the compression tests (The index «o» corresponds to the samples of the natural state, the index «k» — to the samples after the compression tests)

пор в деформирование на каждой ступени нагружения, дисперсность и анизотропия.

Анализ полученных данных позволяет судить о размере структурных элементов, наиболее подверженных деформациям в заданном диапазоне нагрузок. При компрессионных испытаниях гидротермальных глинистых грунтов деформация образца происходит, в первую очередь, за счет частичного закрытия макропор и межмикроагрегатных пор. При этом содержание ультрамикропор и межмикроагрегатных тонких микропор меняется несущественно.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-05-00971а). В качестве аппаратной базы для исследований использовалось оборудование, приобретенное в рамках реализации Программы развития Московского университета.*

## Благодарности

*Авторы выражают благодарность к.г.-м.н., старшему научному сотруднику ИГЕМ РАН и геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Виктории Валерьевне Крупской за проведение количественного анализа минерального состава исследуемых грунтов, а также всем сотрудникам Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН за практическую помощь в полевых исследованиях.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Кошелев А.Г., 2013. Влияние особенностей микростроения глинистых грунтов различного генезиса на их деформирование при компрессионных и штамповых испытаниях. *Геоэкология*, № 6, с. 552–559.
2. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Чернов М.С., Разгулина О.В., Юрковец Д.И., 2014. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп — рентгеновский компьютерный микротомограф (РЭМ-μКТ). *Геоэкология*, № 5, с. 457–463.
3. Денисов Н.Я., 1972. *Природа прочности и деформаций грунтов*. Стройиздат, Москва.
4. Зиангиров Р.С., 1979. *Объемная деформируемость глинистых грунтов*. Наука, Москва.
5. Осипов В.И., 1979. *Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород*. Издательство МГУ, Москва.

6. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А., 1989. Микроструктура глинистых пород. Недра, Москва.
7. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., 2008. Исследование микроструктуры грунтов с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений. Геоэкология, № 4, с. 377–382.
8. Туровская А.Я., 1957. О влиянии деформации на структуру глинистых грунтов. Издательство Днепропетровского института инженеров транспорта, Днепропетровск.
9. Фадеева В.С., 1957. Ориентация частиц глины в процессе деформации глиняной массы. Коллоидный журнал, Том XIX, № 5, с 638–643.
10. Чернов М.С., Соколов В.Н., Белобородов Р.М., Разгулина О.В., Крупская В.В., Алёшин А.Р., 2016. О формировании свойств современных глинистых грунтов гидротермального генезиса. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи, Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Вып. 18, Москва, 2016, с. 105–110.
11. Adnan Sufiana, Adrian R. Russell, 2013. Microstructural pore changes and energy dissipation in Gosford sandstone during pre-failure loading using X-ray CT. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 57, pp. 119–131.
12. Alaoui A., Lipiec J., Gerke H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. Soil and Tillage Research, Vol. 115–116, pp. 1–15.
13. Amer Deiricha, Brendan Caseyb, John T. Germainea, Guangping Xuc, 2018. The integration of magnifications: a novel approach to obtain representative information about the pore space of mudrocks from SEM images. Applied Clay Science, No. 154, pp. 73–82.
14. Houben M.E., Desbois G., Urai J.L., 2013. Pore morphology and distribution in the Shaly facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland): insights from representative 2D BIB–SEM investigations on mm to nm scale. Applied Clay Science, No. 71, pp. 82–97.
15. Houben M.E., Desbois G., Urai J.L., 2014. Structural comparative study of representative 2D microstructures in Shaly and Sandy facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland) inferred from BIB-SEM and MIP methods. Marine and Petroleum Geology, No. 49, pp. 143–161.
16. Suksun Horpibulsuk, Runglawan Rachan, Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon, Apichat Suddeepong, 2010. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. Construction and Building Materials, No. 24, pp. 2011–2021.

## REFERENCES

1. Bulygina L.G., Sokolov V.N., Koshelev A.G., 2013. Influence of features of microstructure of clay soils of different Genesis on their deformation during compression and stamp tests. Geocology, No. 6, pp. 552–559. (in Russian)
2. Bulygina L.G., Sokolov V.N., Chernov M.S., Razgulina O.V., Jurkovec D.I., 2014. Analysis of soil structure with complex scanning electron microscope - x-ray computer microtomograph (SEM-μKT). Geocology, No. 5, pp. 457–463. (in Russian)
3. Denisov N.Ya., 1972. Nature of strength and deformation of soils. Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
4. Ziangirov R.S., 1979. Volumetric deformability of clay soils. Nauka, Moscow. (in Russian)
5. Osipov V.I., 1979. Nature of strength and deformation properties of clay rocks. Publishing House of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
6. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumianceva N.A., 1989. Microstructure of clay-soils. Nedra, Moscow. (in Russian)
7. Sokolov V.N., Jurkovec D.I., Razgulina O.V., 2008. Study of soil microstructure using computer analysis of SEM-images. Geocology, No. 4, pp. 377–382. (in Russian)
8. Turovskaya A.Y., 1957. On the effect of deformation on the structure of clay soils. Publishing house of the Dnepropetrovsk Institute of Transport Engineers, Dnepropetrovsk. (in Russian)
9. Fadeeva V.S., 1957. Orientation of clay particles during deformation of clay mass. Colloid Journal, Vol. XIX, No. 5. pp. 638–643. (in Russian)
10. Chernov M.S., Sokolov V.N., Beloborodov R.M., Razgulina O.V., Krupskaya V.V., Aleshin A.R., 2016. On the formation of properties of modern clay soils of hydrothermal genesis. Fundamental problems and applied tasks, Sergeevsky readings, Materials of the annual session of the Scientific Council of RAS for the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology, Issue 18, Moscow, 2016, pp. 105–110. (in Russian)
11. Adnan Sufiana, Adrian R. Russell, 2013. Microstructural pore changes and energy dissipation in Gosford sandstone during pre-failure loading using X-ray CT. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 57, pp. 119–131.
12. Alaoui A., Lipiec J., Gerke H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. Soil and Tillage Research, Vol. 115–116, pp. 1–15.
13. Amer Deiricha, Brendan Caseyb, John T. Germainea, Guangping Xuc, 2018. The integration of magnifications: a novel approach to obtain representative information about the pore space of mudrocks from SEM images. Applied Clay Science, No. 154, pp. 73–82.
14. Houben M.E., Desbois G., Urai J.L., 2013. Pore morphology and distribution in the Shaly facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland): insights from representative 2D BIB–SEM investigations on mm to nm scale. Applied Clay Science, No. 71, pp. 82–97.
15. Houben M.E., Desbois G., Urai J.L., 2014. Structural comparative study of representative 2D microstructures in Shaly and Sandy facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland) inferred from BIB-SEM and MIP methods. Marine and Petroleum Geology, No. 49, pp. 143–161.
16. Suksun Horpibulsuk, Runglawan Rachan, Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon, Apichat Suddeepong, 2010. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. Construction and Building Materials, No. 24, pp. 2011–2021.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****КУЗНЕЦОВ РУСЛАН АЛЕКСЕЕВИЧ**

Ведущий инженер лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

**ЧЕРНОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ**

Старший научный сотрудник лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

**СОКОЛОВ ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ**

Заведующий лабораторией грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., профессор, г. Москва, Россия

**РАЗГУЛИНА ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА**

Ведущий инженер лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

**ЮРКОВЕЦ ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ**

Руководитель отдела научного оборудования ООО «Токио Бозки (РУС)», к.ф.-м.н., г. Москва, Россия

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****RUSLAN A. KUZNETSOV**

Leading engineer of the Laboratory of soil science and soil improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**MIKHAIL S. CHERNOV**

Senior research scientist of the Laboratory of soil science and soil improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

**VYACHESLAV N. SOKOLOV**

Head of the Laboratory of soil science and soil improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), professor, Moscow, Russia

**OLGA V. RAZGULINA**

Leading engineer of the Laboratory of soil science and soil improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**DMITRIY I. URKOVETS**

Head of the Department of scientific equipment, "Tokyo Boeki (RUS)" LLC, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, Russia



Фото М.С. Чернова