

DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.03  
УДК 552.525

**А.В. Андрианов<sup>1</sup>, В.В. Середин<sup>1,2</sup>, С.Г. Ашихмин<sup>2</sup>,  
С.Н. Тагильцев<sup>3</sup>, Г.М. Батракова<sup>2</sup>, К.А. Алванян<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>3</sup>Уральский государственный горный университет

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ГЛИН**

Пористость глин оказывает существенное влияние на физико-химические свойства грунтов, так, с увеличением размера пор возрастает фильтрация пород. При литогенезе и постгенетических процессах изменяется пустотность глин (пористость и трещиноватость), которые во многом определяют скорость и дебиты флюида, особенно это касается нефтяных предприятий. Влияние давления (техногенной нагрузки) на изменение состава, структуры и свойств глин изучено достаточно подробно, однако еще много вопросов требуют научных обоснований и исследований. Так, совершенно не затронуты вопросы изменения структуры пакетов минералов каолинита, подверженных сжатию, хотя она оказывает значительное влияние на свойства глин. Кроме того, тема формирования пористости глин при сжатии и, как следствие, удельной поверхности пор до настоящего времени остается открытой, хотя эти процессы во многом определяют набухание, адсорбцию, пластичность и другие свойства глин. В статье приводятся экспериментальные исследования авторов, раскрывающие закономерности влияния высоких давлений на изменения диаметра, длины и объема пор в каолиновой и бентонитовой глинах.

**Ключевые слова:** пористость, каолиновая и бентонитовая глины, давление, структура пакетов минералов.

Пористость глин оказывает существенное влияние на физико-химические свойства грунтов [1–3], так, с увеличением размера пор возрастает фильтрация пород [4]. При литогенезе и постгенетических процессах [5] изменяется пустотность глин (пористость и трещиноватость), которые во многом определяют скорость и дебиты флюида [6], особенно это касается нефтяных предприятий. Разработчики на основании этой информации используют оптимальные технологии добычи нефти [7]. Однако природные свойства глин в ряде случаев не отвечают требованиям промышленности, поэтому для придания им заданных характеристик их активируют различными способами. Ранними исследованиями в этом направлении занимались Е.М. Сергеев [8], Гойло и

др. [9], Лучицкий [10], Франк-Каменецкий [11]. Так, ультрафиолетовой активации посвящены работы [12–14], ультразвуковой [15], кислотной [16], щелочной [17, 18], давлением [9, 10].

Следует отметить группу исследователей [1], которые достаточно детально изучили влияние стрессового давления на изменение состава, структуры и свойств каолиновой и бентонитовой глин. Так, в работах [19, 20] представлены данные влияния давления на изменения гранулометрического состава каолиновой, монтмориллонитовой глин, площади их активной поверхности, дефектности минералов каолинита и монтмориллонита, изменению масс связанной воды в глинах [4]. В работах [20, 21] исследовано влияние давления на изменение гранулометрического состава, дефектности структуры и адсорбционных свойств бентонитовой глины. В работе [22] Медведева с соавторами раскрыла изменение дзета-потенциала и сорбционной способности глин, подверженных сжатию. В исследовании [23] представлены результаты по изменению сил адгезии на поверхности частиц каолина, подверженного сжатию, и энергетических свойств поверхности глинистых частиц каолина, бентонита и аргиллитоподобного монтмориллонита. А.В. Анюхина с соавторами [24] выявила, что при воздействии комплексной техногенной нагрузки (давления, термической и химической обработки) наблюдается увеличение адсорбции бентонитовой глины. Адсорбция в большей степени связана с валентностью катионных растворов при технологии обработки бентонитовой глины температурой в 200 °С. При термической обработке глины температурой в 400 °С валентность катионных растворов имеет подчиненное значение на формирование адсорбции глин. Как видно, влияние давления (техногенной нагрузки) на изменение состава, структуры и свойств глин изучено достаточно подробно, однако еще много вопросов требуют научных обоснований и исследований. Так, совершенно не затронуты вопросы изменения структуры пакетов минерала каолинит, подверженных сжатию, хотя, по данным В.И. Осипова, она (структура) оказывает значительное влияние на свойства глин [25]. Кроме того, тема формирования пористости глин при сжатии и, как следствие, удельной поверхности пор до настоящего времени остается открытой, хотя эти процессы во многом определяют набухание, адсорбцию, пластичность и другие свойства глин. Поэтому целью работы является изучить влияние высоких давлений на изменения пористости глин.

Объектом исследований стали обогащенные каолиновая и бентонитовая глины.

**Методика исследований.** Методики обогащения глин и подготовки образцов при давлении от нуля до 800 МПа приведены в работе [1].

Показатели образцов пористых глин определялись методами низкотемпературной физической адсорбции газообразного азота в порах исследуемых материалов на анализаторе удельной поверхности ASAP 2020MP (Micrometrics, США) при температуре жидкого азота – 196 °С.

Обработанный давлением образец массой 0,15–0,5 г помещается в измерительную пробирку анализатора и устанавливается на порт подготовки прибора для дегазации от поглощённых газов, паров влаги и других летучих компонентов.

Дегазация образцов проводится при одновременном нагреве до 200 °С и их вакуумировании. Образец при заданной температуре и остаточном давлении не более 4 Па дегазируется в течение 2 ч. После дегазации на весах определяется масса образца, учитываемая при его анализе. Затем образец устанавливается на порт анализа прибора.

При запуске анализа в измерительной пробирке с образцом создаётся разрежение. Затем прибором автоматически, исходя из заданных настроек анализа, в пробирку дозируется определённое количество газа адсорбента (азота). Молекулы газа сталкиваются с чистой (дегазированной) поверхностью образца и либо отталкиваются, либо адсорбируются на ней. Время, за которое молекулы газа адсорбируются на поверхности, зависит от энергетики поверхности, физической и химической природы образца и газа и температуры. В процессе адсорбции концентрация молекул в газе и соответственно давление газа снижаются. Датчики давления прибора регистрируют это изменение, и по температуре газа и объёму пробирки анализатор определяет число адсорбированных молекул.

Затем прибор дозирует следующую порцию газа азота. Процесс адсорбции газа образцом повторяется. Пошагово увеличивая количество дозируемого газа до относительного давления, равного единице, получаем зависимость количества поглощённого образцом газа от его относительного давления, или изотерму адсорбции.

После определения и построения изотермы адсорбции прибор пошагово уменьшает количество газа в пробирке путём его откачивания от относительного давления, равного единице, до заданного значения, обычно не менее 0,005 ( $P/P_0$ ). Значения относительного давле-

ния газа в пробирке и соответствующего ему количества адсорбированного газа регистрируются прибором, и по этим значениям строится изотерма десорбции. После обработки полученных значений и изотерм адсорбции-десорбции программным обеспечением прибора получаем показатели пористой структуры образцов.

При анализе образцов глин определяются следующие показатели:

- удельная площадь поверхности образцов  $S_{БЭТ}$ ,  $m^2/g$ , определяется по методу Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ);
- общий объем пор  $V_{сум}$ ,  $cm^3/g$ , определяется по количеству азота, адсорбированного при относительном давлении  $p/p_0 \approx 1$ ;
- средний размер пор  $D_{ср}$ , нм (по методу БЭТ);
- кривая распределения пор по размеру по методу ВЖ (Barrett – Joyner – Halenda);
- объём микропор  $V_m$ ,  $cm^3/g$ , определяется по T-plot методу;
- площадь поверхности микропор  $S_m$ ,  $m^2/g$ , определяется по T-plot методу.

**Результаты исследований.** Оценка пористости глин определялась по показателям: диапазон изменения пористости; среднее значение диаметра пор; площадь удельной поверхности и объем пор, производилась по каждому образцу, обработанному давлением от  $P = 0$  до  $P = 800$  МПа. Затем по методике, изложенной выше, рассчитывались значения пористости образцов для каждого заданного давления активации глин.

Поэтому на первом этапе рассмотрим показатели пористости исходных глин, а на втором – влияние давления на изменение пористости каолиновой и бентонитовой глин.

Результаты экспериментальных исследований порового пространства исходных каолиновой и бентонитовой глин приведены в табл. 1.

Используя данные таблицы, построены ранжированные вариационные ряды средних размеров пор в каолиновой и бентонитовой глинах (рис. 1). Из рисунка видно, что в бентонитовой и каолиновой глинах распределение пор по размерам сопоставимы между собой, однако в бентонитовой глине дополнительно выделяются поры размером 1,7–2,0 нм.

В табл. 2 приведены значения пористости исходных глин, рассчитанные по методу БЭТ. Из таблицы видно, что в исходной бентонитовой глине диаметр пор ( $d = 3,6$  нм) меньше, чем в каолине ( $d = 14,2$  нм). Кроме того, в бентоните выделяются микропоры, а в каолине они не выявлены.

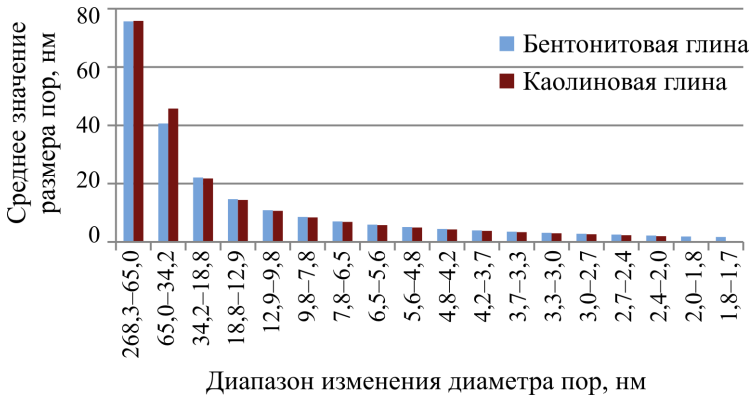


Рис. 1. Ранжированные вариационные ряды диаметров пор в каолиновой и бентонитовой глинах

Таблица 1

Показатели пористости исходных глин

№ п/п	Бентонитовая глина				Каолиновая глина			
	диаметр пор, нм		площадь удельной поверхности пор, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	объем пор, $V$ , см <sup>3</sup> /г	диаметр пор, нм		площадь удельной поверхности пор, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	объем пор, $V$ , см <sup>3</sup> /г
	диапазон измерений	средние значения			диапазон измерений	средние значения		
1	268,3–65,0	75,65777	0,641798	0,012139	240,1–64,6	75,8127	2,446407	0,046367
2	65,0–34,2	40,60936	0,827549	0,008402	64,6–39,1	45,72532	1,967123	0,022487
3	34,2–18,8	22,12851	1,744922	0,009653	39,1–18,3	21,78469	5,556746	0,030263
4	18,8–12,9	14,69744	1,793037	0,006588	18,3–12,7	14,40819	3,007454	0,010833
5	12,9–9,8	10,88061	1,901505	0,005172	12,7–9,6	10,65889	2,466413	0,006572
6	9,8–7,8	8,581872	2,023372	0,004341	9,6–7,7	8,385799	2,104791	0,004413
7	7,8–6,5	7,053122	2,155594	0,003801	7,7–6,3	6,863117	1,834377	0,003147
8	6,5–5,6	5,95848	2,301707	0,003429	6,3–5,4	5,770737	1,63082	0,002353
9	5,6–4,8	5,130484	2,507219	0,003216	5,4–4,6	4,946076	1,460442	0,001806
10	4,8–4,2	4,479659	2,757404	0,003088	4,6–4,0	4,296116	1,378109	0,00148
11	4,2–3,7	3,951845	3,087252	0,00305	4,0–3,6	3,768362	1,410037	0,001328
12	3,7–3,3	3,511141	3,544302	0,003111	3,6–3,2	3,328499	1,477631	0,00123
13	3,3–3,0	3,134493	4,18252	0,003278	3,2–2,8	2,9521	1,69208	0,001249
14	3,0–2,7	2,821571	4,555023	0,003213	2,8–2,5	2,625047	1,915043	0,001257
15	2,7–2,4	2,529208	6,213645	0,003929	2,5–2,2	2,331232	2,032008	0,001184
16	2,4–2,0	2,183863	10,79936	0,005896	2,2–1,9	2,002047	2,709411	0,001356
17	2,0–1,8	1,880713	10,83435	0,005094	–	–	–	–
18	1,8–1,7	1,719912	4,580774	0,00197	–	–	–	–

Таблица 2

Значение пористости исходных глин

Переменные	Значение пористости	
	бentonитовая глина	каолиновая глина
Диаметр мезопор, $d$ , нм	3,6	14,2
Объем мезопор, $V$ , см <sup>3</sup> /г	0,094	0,111
Площадь удельной поверхности мезопор, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	104,33	30,56
Площадь удельной поверхности микропор, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	37,57	Нет

На рис. 2 приведены данные влияния размера пор в исходных глинах на изменение площади удельной поверхности пор ( $S_{уд}$ ). Из рисунка видно, что в бентоните с увеличением диаметра пор площадь удельной поверхности уменьшается. В каолине выявлена иная закономерность, с ростом диаметра пор с  $d = 2,0$  до  $d = 4,2$  нм площадь удельной поверхности уменьшается, при дальнейшем увеличении диаметра пор площадь удельной поверхности, наоборот, возрастает.

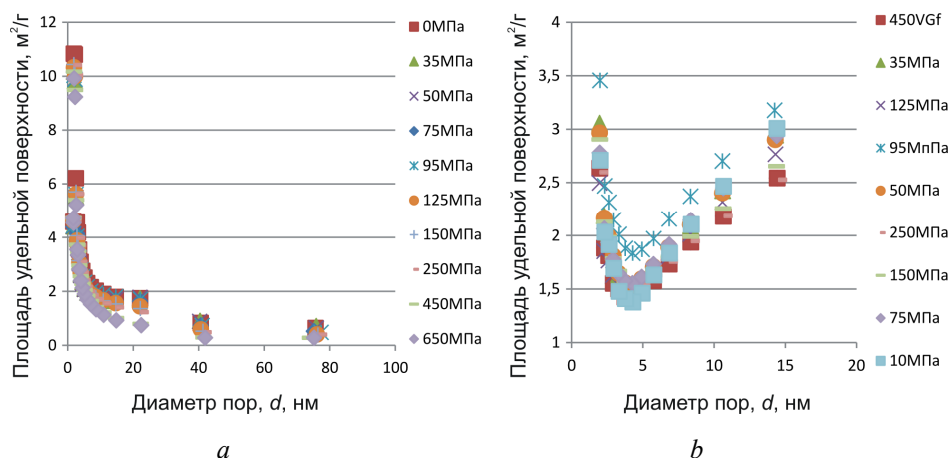


Рис. 2. Изменение площади удельной поверхности пор в глинах от их диаметра: *a* – бентонит; *b* – каолин

Выявленная закономерность характерна не только для исходных глин, но и для глин, обработанных давлением до 800 МПа (см. рис. 2).

**Оценка пористости глин, активированных давлением.** Влияние давления на изменение диаметра пор в глинах приведено на рис. 3. Из

рисунка видно, что с увеличением давления диаметр мезопор уменьшается в бентонитовой глине с  $d = 4,3$  до  $d = 3$  нм, в каолине с  $d = 16,5$  до  $d = 12,5$  нм.

*Влияние давления на изменение объема пор в глинах.* С увеличением давления объем мезопор в бентоните уменьшается с  $V_6 = 0,11$  до  $V_6 = 0,08$  см<sup>3</sup>/г, а в каолине с  $V_k = 0,141$  до  $V_k = 0,081$  см<sup>3</sup>/г (рис. 4).

Таким образом, при увеличении давления наблюдаем уменьшение диаметра и объема пор. Полученные данные согласуются с результатами исследований В.И. Осипова, Н.В. Соколова, Н.А. Румянцевой [26].

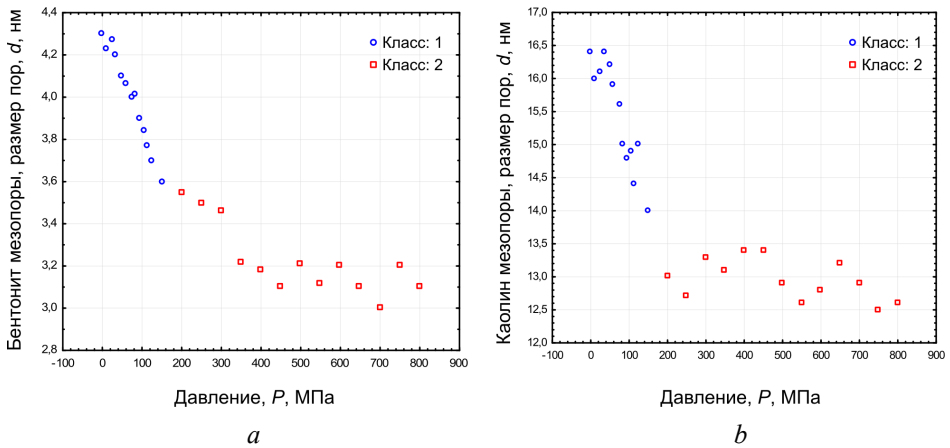


Рис. 3. Влияние давления на изменение диаметра мезопор глин:

*a* – бентонит; *b* – каолин

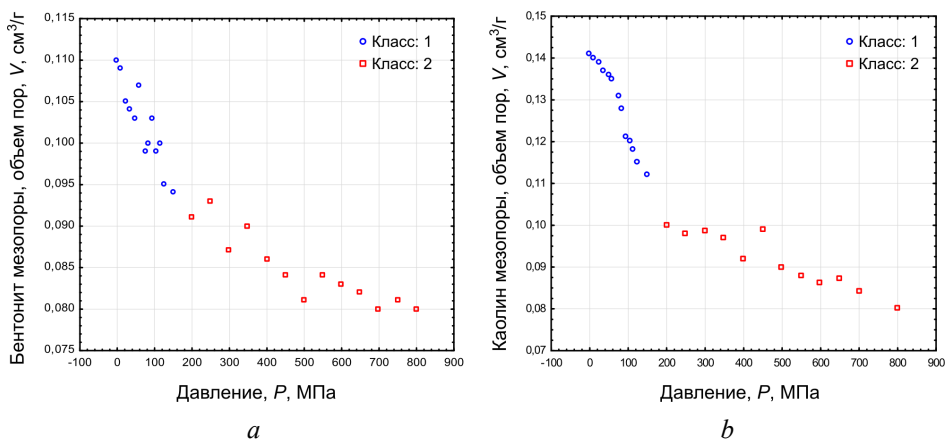


Рис. 4. Влияние давления на изменение объема мезопор глин:

*a* – бентонит; *b* – каолин

**Влияние давления на изменение площади удельной поверхности глин.** На рис. 5 приведены экспериментальные данные влияния давления активации глин на изменения площади удельной поверхности мезо- и микропор.

Из рисунка видно, что с увеличением давления активации бентонитовой глины площадь удельной поверхности мезопор возрастает соответственно с  $S_6 = 99,5$  до  $S_6 = 108 \text{ м}^2/\text{г}$ , а микропор с  $S_6 = 30$  до  $S_6 = 47 \text{ м}^2/\text{г}$ .

В каолине наблюдается противоположная закономерность: с увеличением давления площадь удельной поверхности мезопор уменьшается с  $S_6 = 34,2$  до  $S_6 = 26,1 \text{ м}^2/\text{г}$ .

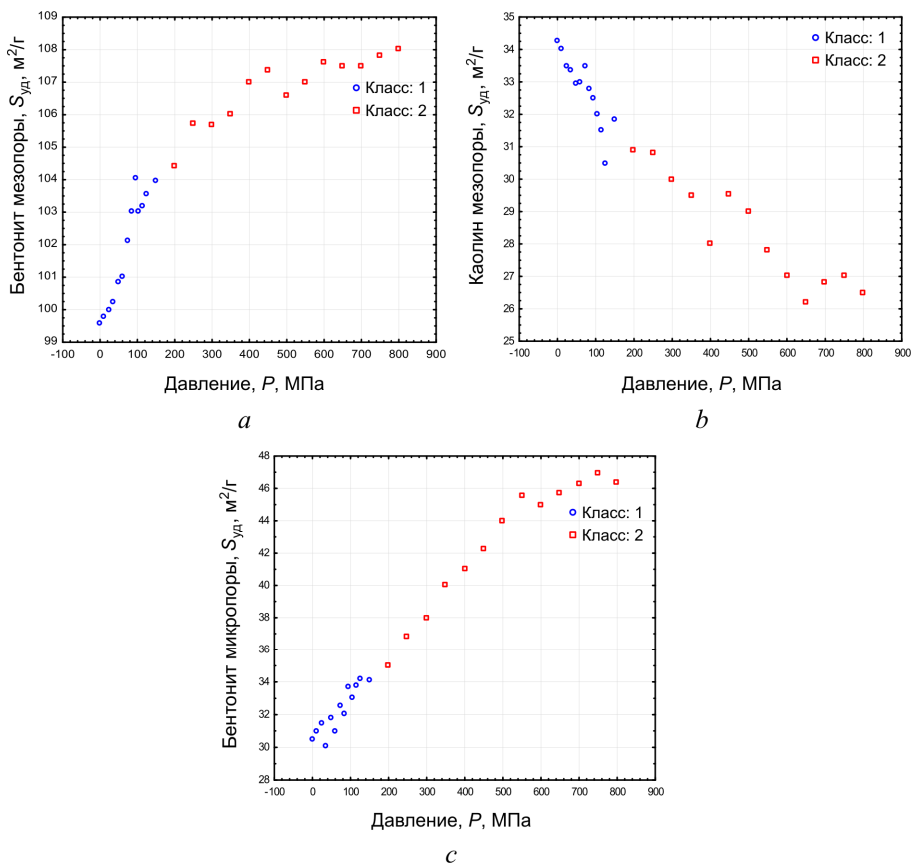


Рис. 5. Влияние давления на изменение площади удельной поверхности мезопор глин (а – бентонит и б – каолин) и микропор (с – бентонит)



Разнонаправленное изменение площади удельной поверхности пор в каолине и бентоните в диапазоне давлений  $P = 0\text{--}800$  МПа обусловлено, вероятно, разнонаправленным изменением морфологии пор и структурных элементов грунта. Рассмотрим влияние этих показателей на изменение  $S_{\text{уд}}$ .

**Моделирование морфологии пор.** Для подтверждения гипотезы о том, что при обработке глин давлением морфология пор в каолине и бентоните изменяется разнонаправленно, разработана модель, позволяющая рассчитать длину пор. При разработке модели использовались следующие экспериментальные данные: средний диаметр пор  $d$  (нм), относительный объем пор  $V$  (см<sup>3</sup>/г) и площадь удельной поверхности пор  $S$  (м<sup>2</sup>/г). Вводим следующее допущение – пора представляет собой прямоугольную призму с основанием в виде квадрата стороной  $d$ , длиной  $b$ .

Тогда объем поры можно представить зависимостью:

$$V = d^2 b \text{ или } b = V/d^2 \quad (1)$$

Площадь поверхности поры можно представить в виде:

$$S = 4db \text{ или } b = S/4d \quad (2)$$

Используя полученную модель (2), проведены расчеты длины пор  $b$  для каждого образца каолина и бентонитовой глины, обработанных давлением. Результаты расчетов приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что в бентонитовой глине в диапазоне давлений  $P = 0\text{--}800$  МПа длина пор увеличивается с  $b = 24,5$  до  $b = 26,95$  см. В каолине наблюдается иная закономерность: с увеличением давления длина пор уменьшается с  $b = 8,5$  до  $b = 6,6$  см.

Таким образом, выдвинутая гипотеза о том, что площадь удельной поверхности глин связана с морфологией пор, подтверждена модельными исследованиями.

**Оценка морфологии пор по данным электронной микрофотографии.** Работы выполнялись на сканирующем электронном микроскопе JSM 6390LV (JEOL, Япония). Режим работы прибора; рабочее расстояние 12 мм, ток – 10 мА, рабочее напряжение – 20 кВ. Электронное микрофотографирование глинистой фракции образцов выполнено при разных увеличениях (от нескольких сотен до 30 тысяч раз) с целью отразить строение как отдельных микрочастиц минералов, так и разные уровни их агрегатов.

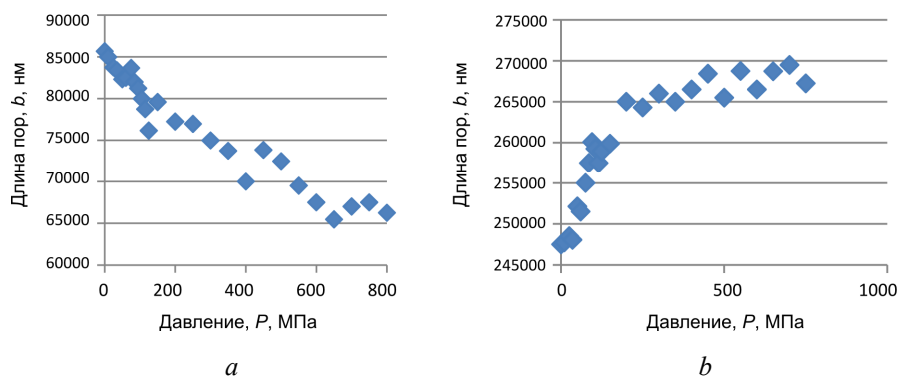


Рис. 6. Влияние давления на изменение длины пор: *a* – каолиновой глины; *b* – бентонитовой глины

Ниже приведены электронные микрофотографии глинистых фракций монтмориллонитового и каолинитового состава. Для каждой серии экспериментов сделано от 4 до 6 снимков при разных увеличениях агрегатов и отдельных скоплений глинистых частиц в локальных участках.

*Исходный образец (P = 0 МПа).* Монтмориллонитовая глина представлена агрегатами разного размера, но преимущественно малыми – первыми микрометрами микрона. В пространстве между агрегатами встречаются даже наночастицы размером менее 100 нм (рис. 7, *a*).

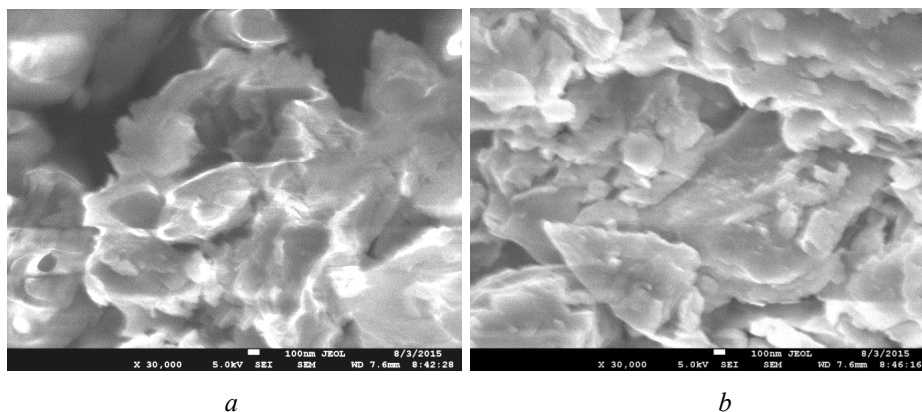


Рис. 7. Структура исходных образцов монтмориллонита (*a*) и каолина (*b*)

Агрегаты имеют неправильную форму, обнаружены также кольцеобразные формы размером 0,5–1,0 мкм в поперечнике, которые закономерно сочетаются друг с другом. Кроме того, встречаются и ок-

руглые фрагменты с пустотами. Между агрегатами расположены пустоты и каналы, имеющие неправильную форму.

Каолин представлен достаточно крупными агрегатами, преимущественно десятками микрометров (рис. 7, *b*). По сравнению с монтмориллонитовой глиной их размеры в 3–4 раза крупнее. Между агрегатами наблюдаются достаточно крупные и короткие поры.

*Образцы режима сжатия  $P = 300$  МПа.* Образцы монтмориллонита, обработанные давлением  $P = 300$  МПа, имеют удлиненную форму, объем пор уменьшается (рис. 8, *a*). В каолине (рис. 8, *b*) прослеживается влияние давления на форму агрегатов, которая представляет собой изометрическую, уплощенную и ячеистую структуру. Пустотное пространство представлено крупными порами.

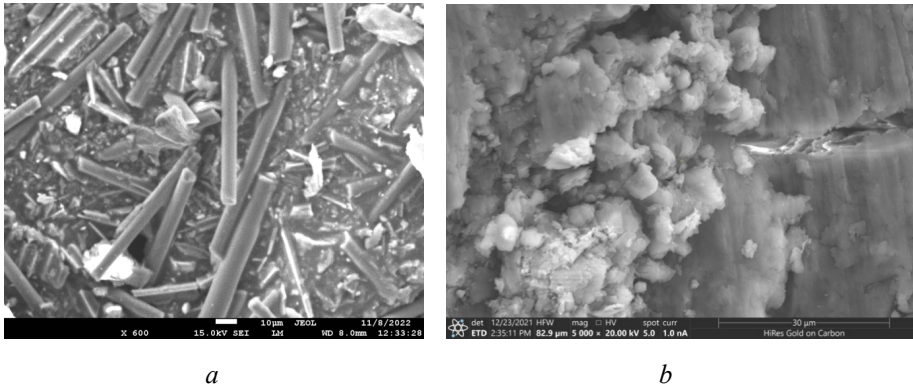


Рис. 8. Монтмориллонит (*a*) и каолин (*b*), обработанные давлением  $P = 300$  МПа

Таким образом, при обработке монтмориллонита давлением  $P = 300$  МПа увеличивается длина поры. Сами поры тонкие и длинные. В каолине, наоборот, длина пор меньше их диаметра, поры крупные и короткие.

**Выводы.** Давление оказывает влияние на формирование пористости. Так, при увеличении давления диаметр и объем пор уменьшаются, при этом средний диаметр мезопор в бентоните составляет около 4 нм, а в каолине 16 нм. В бентоните выявлены микропоры, а в каолине они не установлены.

В бентонитовой глине при активации ее давлением наблюдается увеличение длины и уменьшение диаметра внутриагрегатных пор, за счет слабых структурных связей между минералами монтмориллонита

и, как следствие, их подвижности. Поэтому с увеличением давления до  $P = 800$  МПа наблюдается увеличение площади удельной поверхности мезо- и микропор.

В каолиновой глине наблюдается противоположная закономерность: с увеличением давления уменьшается длина и увеличивается диаметр внутриагрегатных пор за счет достаточно жестких структурных связей между минералами и микроагрегатами каолина. Поэтому с увеличением давления до  $P = 800$  МПа наблюдается уменьшение площади удельной поверхности мезопор.

#### Библиографический список

1. Изменение физико-химических свойств глин, подверженных давлению / В.В. Середин, О.С. Ситева, К.А. Алванян, А.В. Андрианов // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 304–316.
2. Середин, В.В. Закономерности изменения адсорбционных свойств глин, активированных давлением и ионами железа / В.В. Середин, М.А. Джугинисов, К.В. Шеина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 672–685.
3. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, В.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С. Зиангиров. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2005. – 1024 с.
4. Seredin, V.V. Classification of bound water forms in kaolinitic clays / V.V. Seredin, M.R. Yadzinskaya, A.V. Andrianov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2021. – 332 (6). – P. 73–81.
5. О природе изменения состава и свойств глинистых пород в процессе литогенеза / З.А. Кривошеева, Р.И. Злочевская, В.А. Королев, Е.М. Сергеев // Вестник Моск. ун-та. Серия: Геология. – 1977. – № 4. – С. 60–73.
6. Возможности учета трещиноватости каширо-верейских карбонатных объектов при планировании пропантного гидоразрыва пласта / А.С. Вогинов, В.В. Середин, И.Ю. Кольчев, С.В. Галкин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 861–871. DOI: 10.31897/PMI 2021.6.8
7. Geological environment changes during oil fields development in complex geological conditions / V.V. Seredin, M.V. Pushkareva, L.O. Leibowich, A.V. Tatarkin, A.A. Filimonchikov // Oil Industry. – 2014. – № 12. – P. 153–155.
8. Сергеев, Е.М. К вопросу уплотнения пылеватого грунта большими нагрузками / Е.М. Сергеев // Вестник Моск. ун-та. – 1946. – № 1. – С. 91–93.
9. Гойло, Э.А. Экспериментальное исследование влияния давления и температуры на кристаллические структуры каолинита, иллита и монтмориллонита / Э.А. Гойло, Н.В. Котов, В.А. Франк-Каменецкий // Физические методы исследования осадочных пород. – М.: Наука, 1966. – С. 123–129.
10. Лучицкий, И.В. Эксперименты по деформации горных пород в обстановке высокий давлений и температур / И.В. Лучицкий, В.И. Громин, Г.Д. Ушаков. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1967. – 77 с.
11. Франк-Каменецкий, В.А. Трансформационные преобразования слоистых силикатов при повышенных  $p$ - $T$ -параметрах / В.А. Франк-Каменецкий, Н.В. Котов, Э.А. Гойло. – Л.: Недра, 1983. – 151 с.
12. Гомес, М.Ж. Ультрафиолетовая активация природных глин ангольских месторождений для повышения их сорбционной активности в процессах водоочистки: дис. ... канд. техн. наук: 12.00.05 / Гомес Мигел Жеронимо. – Белгород, 2015. – 167 с.
13. Кара-Сал, Б.К. Повышение адсорбционных свойств глинистых пород Тувы в зависимости от методов активации / Б.К. Кара-Сал, Т.В. Сапелкина // Актуальные проблемы современной науки. – М., 2012. – № 5 (67). – С. 158–162.

14. Сорбционные свойства УФ-активированных глин Ангольских месторождений / Ж.А. Сапронова, В.С. Лесовик, М.Ж. Гомес, К.И. Шайхиева // Вестник Казанского нац. исслед. техн. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 91–93.
15. Ультразвуковая обработка дисперсий глинистых минералов / Н.Н. Круглицкий, С.П. Ничипоренко, В.В. Симуров, В.В. Минченко; под общ. ред. Н.Н. Круглицкого. – Киев: Наукова Думка, 1971. – 198 с.
16. Мосталыгина, Л.В. Кислотная активация бентонитовой глины / Л.В. Мосталыгина, Е.А. Чернова, О.И. Бухтояров // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – 2012. – № 24. – С. 57–61.
17. Тучкова, А.И. Влияние щелочной активации глинистых минералов на их сорбционную способность к извлечению Cs-137 из отработавшего масла / А.И. Тучкова, Е.А. Тюпина, М.Г. Рахимов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. – 2012. – Т. XXVI, № 6 (135). – С. 92–95.
18. Шапкин, Н.П. Химическая модификация природной глины / Н.П. Шапкин, Л.Б. Леонтьев, И.Г. Хальченко // Журнал неорганической химии. – 2017. – Т. 62, № 9.
19. Паршина, Т.Ю. Формирование микроагрегатного состава глин при их сжатию / Т.Ю. Паршина, В.В. Середин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 142–146.
20. Алванян, К.А. Застороженности изменения гранулометрического состава бентонитовой глины Зырянского месторождения активированной давлением / К.А. Алванян, А.В. Андрианов, Ю.Н. Селезнева // Вестник Пермского университета. Серия «Геология». – 2020. – Т. 19, № 4. – С. 380–387. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.380
21. Алванян, К.А. Изменение состава глин, подверженных техногенному воздействию / К.А. Алванян, А.В. Растегаев, Т.Ю. Хлуденева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 117–127. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.2
22. Изменение дзета-потенциала глин, подверженных сжатию / Н.А. Медведева, К.А. Алванян, Ю.О. Мальгина, В.В. Середин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 4–14. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.1
23. Федоров, М.В. Формирование энергетических свойств поверхности глинистых частиц, модифицированных высоким давлением / М.В. Федоров, В.В. Середин, И.В. Лунегов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 33–48.
24. Влияние термической обработки глин на их адсорбцию по красителю метиленовой голубой / А.В. Анохина, В.В. Середин, А.В. Андрианов, Т.Ю. Хлуденева // Недропользование. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 52–57.
25. Осипов, В.И. Глины и их свойства / В.И. Осипов, В.Н. Соколов. – М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.
26. Осипов, В.И. Микроструктура глинистых пород / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.

## References

- Seredin V.V., Siteva O.S., Alvanjan K.A., Andrianov A.V. *Izmenenie fiziko-himicheskikh svojstv glin, podverzhennyh davleniju* // Nedropolzovanie. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 304–316.
- Seredin V.V., Dzhuginisov M.A., Sheina K.V. *Zakonovernosti izmenenija adsorbicijnyh svojstv glin, aktivirovannyh davleniem i ionami zheleza. 2023 Izvestija Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. 2023. № 4. S. 672-685.*
- Trofimov V.T. *Gruntovedenie* / V.T. Trofimov, V.A. Korolev, V.A. Voznesenskij, G.A. Golodkovskaja, Ju.K. Vasilchuk, R.S. Ziangirov. – 6-e izd., pererab. i dop. – М.: Izd-vo MGU, 2005. – 1024 s.
- Seredin, V.V., Yadzinskaya, M.R., Andrianov, A.V. *Classification of bound water forms in kaolinitic clays 2021. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering 332 (6), s. 73-81*
- Krivosheeva Z.A. *O prirode izmenenija sostava i svojstv glinistyh porod v processe litogeneza* / Z.A. Krivosheeva, R.I. Zlochevskaja, V.A. Korolev, E.M. Sergeev // Vestnik Mosk. un-ta. Serija: Geologija. – Moskva, 1977. – № 4. – С. 60–73.

6. Votinov A.S., Seredin V.V., Kolychev I. Ju, Galkin S.V. Vozможности ucheta treshhinovostati kashiro-verejskih karbonatnyh ob#ektov pri planirovanii propantnogo gidorazyva plasta., 2021. Zapiski Gornogo instituta. Tom 252. S. 861-871. DOI: 10.31897/PMI 2021.6.8
7. Seredin, V.V., Pushkareva, M.V., Leibowich, L.O., (...), Tatarin, A.V., Filimonchikov, A.A. Geological environment changes during oil fields development in complex geological conditions. 2014. Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry12, s. 153-155.
8. Sergeev E.M. K voprosu uplotnenija pylevatogo grunta bolshimi nagruzkami / E.M. Sergeev // Vestnik Mosk. un-ta. – 1946. – № 1. – S. 91–93.
9. Gojlo Je.A., Kotov N.V., Frank-Kameneckij V.A. Jeksperimentalnoe issledovanie vlijanija davlenija i temperatury na kristallicheskie struktury kaolinita, illita i montmorillonita // Fizicheskie metody issledovanija osadochnyh porod. – M.: Nauka, 1966. – S. 123–129.
10. Luchickij I.V. Jeksperimenty po deformacii gornyh porod v obstanovke vysokij davlenij i temperatur / I.V. Luchickij, V.I. Gromin, G.D. Ushakov. – Izdatelstvo «Nauka», Sibirskoe otdelenie, Novosibirsk, 1967. 77 s.
11. Frank-Kameneckij V.A. Transformacionnye preobrazovanija sloistyh silikatov pri povyshennyh p–T-parametrah. / V.A. Frank-Kameneckij, N.V. Kotov, Je.A. Gojlo. L.: Nedra, 1983.151 s.
12. Gomes M.Zh. Ultrafioljetovaja (UF) aktivacija prirodnyh glin angolskih mestorozhdenij dlja povyshenija ih sorbcionnoj aktivnosti v processah vodoочistki: diss. kand. tehn. nauk: 12.00.05 / Gomes Migel Zheronimo. – Belgorod, 2015. – 167 s.
13. Kara-Sal B.K. Povyszenie adsorbcionnyh svojstv glinistyh porod Tuvy v zavisimosti ot metodov aktivacii / B.K. Kara-Sal, T.V. Sapelkina // Aktualnye problemy sovremennoj nauki. – Moskva, 2012. – № 5 (67). – S. 158–162.
14. Saponova Zh.A. Sorbcionnye svojstva UF-aktivirovannyh glin Angolskih mestorozhdenij / Zh.A. Saponova, V.S. Lesovik, M.Zh. Gomes, K.I. Shajhieva // Vestnik KazNITU. – 2015. T. 18. № 1. S. 91–93.
15. Kruglickij N.N. Ultrazvukovaja obrabotka dispersij glinistyh mineralov / N.N. Kruglickij, S.P. Nichiporenko, V.V. Simurov, V.V. Minchenko; pod obshh.red. d.h.n. N.N. Kruglickogo. Naukova Dumka.– Kiev, 1971. – 198 s.
16. Mostalygina L.V. Kislotnaja aktivacija bentonitovoj gliny / L.V. Mostalygina, E.A. Chernova, O.I. Buhtojarov // Vestnik JuUrGU. – 2012. – № 24. – S. 57–61.
17. Tuchkova A.I. Vlijanie shhelochnoj aktivacii glinistyh mineralov na ih sorbcionnuju sposobnost k izvlecheniju Cs-137 iz otrabotavshogo masla / A.I. Tuchkova, E.A. Tjupina, M.G. Rahimov // Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii: sbornik nauchn. trudov. – 2012. – T. XXVI. – № 6 (135). – S. 92–95.
18. Shapkin N.P. Himicheskaja modifikacija prirodnoj gliny / N.P. Shapkin, L.B. Leontev, I.G. Halchenko // Zhurnal neorganicheskogo himii. – T. 62. – № 9. – 2017.
19. Parshina T.Ju., Seredin V.V. Formirovanie mikroagregatnogo sostava glin pri ih szhatii. Sovremennye tehnologii v stroitelstve. Teorija i praktika. 2017. T. 2. S. 142-146.
20. Alvanjan K.A., Andrianov A.V., Selezneva Ju.N. Zakonomernosti izmenenija granulometricheskogo sostava bentonitovoj gliny Zyrjanskogo mestorozhdenija aktivirovannoj davleniem // Vestnik Permskogo universiteta. Serija «Geologija». – 2020. – T. 19. – № 4. – S. 380–387. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.380.
21. Alvanjan K.A., Rastegaev A.V., Hludeneva T.Ju. Izmenenie sostava glin, podverzhennyh tehnogennomu vozdejstviju // Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2019. – T. 19. – № 2. – S. 117–127. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.2.
22. Medvedeva N.A., Alvanjan K.A., Malgina Ju.O., Seredin V.V. Izmenenie dzeta-potenciala glin, podverzhennyh szhatiju // Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2019. – T. 19. – № 1. – S. 4–14. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.1.
23. Fedorov M.V., Seredin V.V., Lunegov I.V. Formirovanie jenergeticheskikh svojstv poverhnosti glinistyh chastic, modifirovannyh vysokim davleniem. Vestnik Permskogo universiteta. Geologija. 2021. T. 20. № 1. S. 33-48.

24. Anjuhina A.V., Seredin V.V., Andrianov A.V., Hludeneva T.Ju. Vlijanje termicheskoj obrabotki glin na ih adsorbiciju po krasitelju metilenovoj goluboj // Nedropolzovanie. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 52–57.

25. Osipov V.I. Gliny i ih svojstva / V.I. Osipov, V.N. Sokolov. – М.: GEOS, 2013. – 576 s.

26. Osipov V.I. Mikrostruktura glinistyh porod / V.I. Osipov, V.N. Sokolov, N.A. Rumjanceva. – М.: Nedra, 1989. – 211 s.

**A. Andrianov, V. Seredin, S. Ashihmin,  
S. Tagilcev, G. Batrakova, K. Albanian**

## **EFFECT OF HIGH PRESSURE ON THE FORMATION OF CLAY POROSITY**

The porosity of clays has a significant influence on the physical and chemical properties of soils, for example, as the pore size increases, the filtration of rocks increases. During lithogenesis and post-genetic processes, clay voids (porosity and fracturing) change, which largely determine the fluid velocity and flow rates, especially for oil enterprises. The influence of pressure (anthropogenic load) on changes in the composition, structure and properties of clays has been studied in detail, but there are still many issues that require scientific substantiation and research. Thus, the issues of changing the structure of kaolinite mineral packets subjected to compression, although it has a significant impact on the properties of clays, are not touched at all. Besides, the subject of formation of clay porosity under compression and, as a consequence, specific surface of pores remains open till now, though these processes largely determine swelling, adsorption, plasticity and other properties of clays. The paper presents experimental investigations of the authors revealing the regularities of the influence of high pressures on the changes in the diameter, length and volume of pores in kaolin and bentonite clays.

**Keywords:** porosity, kaolin and bentonite clays, pressure, structure of mineral packets.

**Андрянов Андрей Владимирович** (Пермь, Российская Федерация) – преподаватель кафедры инженерной геологии и охраны недр, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, 614990, ул. Букирева, 15, e-mail: andrianov@nedra.perm.ru).

**Середин Валерий Викторович** (Пермь, Российская Федерация) – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, 614990, ул. Букирева, 15, e-mail: seredin@nedra.perm.ru).

**Ашихмин Сергей Геннадьевич** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: a\_s\_g\_perm@mail.ru).

**Тагильцев Сергей Николаевич** (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии, Уральский государственный горный университет (Екатеринбург, 620144, ул. Куйбышева, 30, e-mail: tagiltsev@k66.ru).

**Батракова Галина Михайловна** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: GМbatrakova@mail.ru).

**Алванян Карине Антоновна** (Пермь, Российская Федерация) – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, 614990, ул. Букирева, 15, e-mail: karinealvanyan@yandex.ru).

**Andrey Andrianov** (Perm, Russian Federation) – Lecturer of the Engineering Geology Department, Perm State National Research University (15, Bukirev str., 614990, Perm, e-mail: andrianov@nedra.perm.ru).

**Valery Seredin** (Perm, Russian Federation) – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Engineering Geology, Perm State National Research University (15, Bukirev str., 614990, Perm, e-mail: seredin@nedra.perm.ru).

**Sergey Ashihmin** (Perm, Russian Federation) – Dr. Sc., Professor of Surveying, geodesy and geographic information systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, e-mail: a\_s\_g\_perm@mail.ru).

**Sergey Tagiltsev** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Dr. Sc., Professor, Head of the Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology Department, Ural State Mining University (30, Kuibysheva str., 620144, Ekaterinburg, e-mail: tagiltsev@k66.ru).

**Galina Batrakova** (Perm, Russian Federation) – Dr. Sc., Professor of Environmental Protection Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, e-mail: GМbatrakova@mail.ru).

**Karine Alvanian** (Perm, Russian Federation) – PhD, Associate Professor of the Engineering Geology Department, Perm State National Research University (15, Bukirev str., 614990, Perm, e-mail: karinealvanyan@yandex.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.

Поступила: 21.02.2024

Одобрена: 26.02.2024

Принята к публикации: 11.03.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Воздействие высокого давления на формирование пористости глин / А.В. Андрианов, В.В. Середин, С.Г. Ашихмин, С.Н. Тагильцев, Г.М. Батракова, К.А. Алванян // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2024. – № 1. – С. 37–52. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.03

Please cite this article in English as: Andrianov A., Seredin V., Ashikhmin S., Tagiltsev S., Batrakova G., Alvanyan K. Effect of high pressure on the formation of clay porosity. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2024, no. 1, pp. 37-52. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.03