

# ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОЩАДЬ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

## INFLUENCE OF PRESSURE ON THE ACTIVE SURFACE AREA OF CLAY SOIL PARTICLES



<http://pro-kamni.ru/kaolinit>

### СЕРЕДИН В.В.

Заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, д. г.-м. н., профессор, г. Пермь, [seredin@nedra.perm.ru](mailto:seredin@nedra.perm.ru)

### РАСТЕГАЕВ А.В.

Профессор кафедры геологии нефти и газа горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, д. г.-м. н., профессор, г. Пермь

### МЕДВЕДЕВА Н.А.

Доцент кафедры физической химии химического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, к. х. н., г. Пермь

### ПАРШИНА Т.Ю.

Аспирант кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь

### SEREDIN V.V.

Head of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection, Geology Faculty, Perm State National Research University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Perm, [seredin@nedra.perm.ru](mailto:seredin@nedra.perm.ru)

### RASTEGAEV A.V.

Professor of the Department of Oil and Gas Geology, Mining and Oil Faculty, Perm State National Research Polytechnic University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Perm

### MEDVEDEVA N.A.

Associate professor of the Physical Chemistry Department, Chemistry Faculty, Perm State National Research University, PhD (Candidate of Science in Chemistry), Perm

### PARSHINA T.Yu.

Postgraduate student of the Engineering Geology Department, Geology Faculty, Perm State National Research University, Perm

### Ключевые слова:

глинистый грунт; давление; гранулометрический анализ; фракция; каолинит; монтмориллонит; частицы глинистого грунта; площадь активной поверхности.

### Key words:

clay soil; pressure; granulometric analysis; fraction; kaolinite; montmorillonite; clay soil particles; active surface area.

### Аннотация

Экспериментально установлено, что с увеличением давления на глинистый грунт наблюдается общая тенденция к уменьшению содержания глинистой фракции и увеличению доли пылеватой фракции. В монтмориллонитовой глине эти изменения происходят более интенсивно, чем в каолинитовой. Фракционный состав глин в диапазоне давлений 0–125 МПа изменяется более интенсивно, чем в диапазонах 125–750 и 800–2 200 МПа. С увеличением давления площадь активной поверхности частиц как каолинитовой, так и монтмориллонитовой глины уменьшается. При этом наибольшая скорость уменьшения наблюдается при давлении до 125 МПа. При давлении более 125 МПа его влияние на площадь активной поверхности частиц менее значительно. Разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать площадь активной поверхности частиц глин в зависимости от степени сжатия этих грунтов.

### Abstract

The authors of this paper have established that, with increasing pressure on clay soil, it is observed a general tendency for the content of the clay fraction to decrease and for the share of the silty fraction to increase. These changes are more intensive in montmorillonite clay, than in kaolinite clay. The changes in the fractional composition of clays are more intensive under pressures of 0–125 MPa, than under pressures of 125–750 and 800–2 200 MPa. With increasing pressure, the active surface area of particles of both kaolinite and montmorillonite clays is decreasing. At that, the maximum rate of this decrease is observed under pressures of not more than 125 MPa. Under pressures of more than 125 MPa, the influence of pressure on the active surface area of particles is less significant. The authors have developed mathematical models that allow predicting the active surface area of clay particles, depending on the compression degree of these soils.

## Введение

Физико-химические свойства грунтов во многом определяются площадью активной поверхности их частиц и энергетической активностью этих поверхностей [22].

Площадь активной поверхности частиц контролируется гранулометрическим составом грунта. Вопросы природного и техногенного формирования гранулометрического состава грунтов отражены в работах [1, 4, 6, 8].

Исследования изменений состава и свойств горных пород при нагружении показали, что при высоких давлениях наряду с механическим дроблением частиц до размеров кристаллов изменяется структура материнской породы [7], протекают твердофазные химические реакции [8] и образуются новые минералы [19].

Н.С. Ениколопян [3] установил, что при сжатии под давлением до 750 МПа пятиводного кристаллогидрата сульфата меди происходят твердофазные химические реакции со взрывом и образованием нового вещества — металлической меди.

Экспериментальные исследования Б.М. Чикова с авторами [19] показали, что при давлении на ортопироксен 2 700 МПа наблюдалось его преобразование: в зоне разрушения из ортопироксена образовались новые минералы (талк, в меньшей мере карбонаты, плагиоклаз и другие минералы давления).

Исследованиями изменений состава и свойств дисперсных грунтов под высоким давлением занимались Е.М. Сергеев, М.М. Филатов, Ч. Адамс, У. Никольсон. Этим вопросам посвящены единичные работы прошлого столетия. Так, Е.М. Сергеев показал в работе [14], что при сжатии песков под давлением 300 МПа содержание тонкой песчаной фракции увеличилось от 13 до 51%, пылевой — от 5 до 23%, глинистой — от 2,15 до 5,42%. Поэтому было высказано предположение о том, что образование глинистых частиц в природных условиях путем механического разрушения более крупных гранулометрических элементов, по-видимому, протекает в весьма ограниченных размерах. К подобным же выводам Е.М. Сергеев пришел и при испытаниях покровных сульфидов на действие давлений 2 000 и 3 660 МПа [13].

Таким образом, вопросы влияния давления на формирование гранулометрического состава глин изучены недостаточно полно, хотя размер частиц, а значит, и их активная поверхность во многом определяют формирование свойств грунта.

Цель данной работы — изучение влияния давления на изменение площади активной поверхности частиц глинистых грунтов.

## Объекты и методика исследований

Объектами исследований явились монтмориллонитовая и каолининовая глины.

По результатам рентгеноструктурного анализа, монтмориллонитовая глина состоит из: монтмориллонита (75%); каолинита (3,6%); кварца (11,4%); альбита (6,7%); кальцита (3,3%).

Каолининовая глина содержит: каолинит (76,7%); монтмориллонит (15,6%); кварц (7,7%).

Для передачи давления на образец глин был спроектирован и изготовлен прибор высокого давления (рис. 1). Рабочие поверхности этого прибора (см. № 3 на рис. 1) выполнены из твердосплавного материала, их площадь составляет 0,75 см<sup>2</sup>. В качестве нагрузочного устройства используется пресс марки ПЛГ-20.

Подготовку образцов для гранулометрического анализа осуществляли следующим образом. Исходный глинистый грунт (порошок) помещался в ступку и растирался пестиком. Затем проба грунта массой около 0,2 г помещалась в рабочую зону (см. № 3 на рис. 1) указанного прибора. После этого прессом (см. № 6 на рис. 1) создавалось вертикальное давление на грунт ( $P$ ) по следующей схеме: на первой ступени  $P=0$  МПа (исходный материал); на второй и последующих ступенях величина  $P$  увеличивалась на 10–50 МПа, максимальное давление составляло 2 200 МПа. Затем верхняя обойма (см. № 2 на рис. 1) перемещалась относительно нижней обоймы (см. № 1 на рис. 1) на 90° путем поворота ручек (см. № 4 на рис. 1).

Всего было изготовлено 56 образцов монтмориллонитовой глины и 65 образцов каолининовой глины.

Гранулометрический состав глин определялся на лазерном дифракционном анализаторе ANALYSETTE 22 MicroTec plus по методике [21]. Технические возможности данного прибора позволяют произвести измерения для частиц размером от 0,08 до 20 000 мкм. В работе [3] отмечалось, что тонкая глинистая фракция с частицами менее 1 мкм во многом определяет физико-химические свойства глин. Поэтому, исходя из возможностей прибора и значительного влияния тонкодисперсных частиц на свойства грунтов, авторы данной работы исследовали фракции с размером частиц: < 0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–5; 5–50 мкм. Далее в тексте, на рисунках и в формулах содержание этих фракций (%) будет обозначаться соответственно:  $\Phi_{<0,1}$ ;  $\Phi_{0,1-0,2}$ ;  $\Phi_{0,2-0,5}$ ;  $\Phi_{0,5-1}$ ;  $\Phi_{1-2}$ ;  $\Phi_{2-5}$ ;  $\Phi_{5-50}$ .

Всего было произведено 319 определений гранулометрического состава для монтмориллонитовой глины и 385 — для каолининовой.

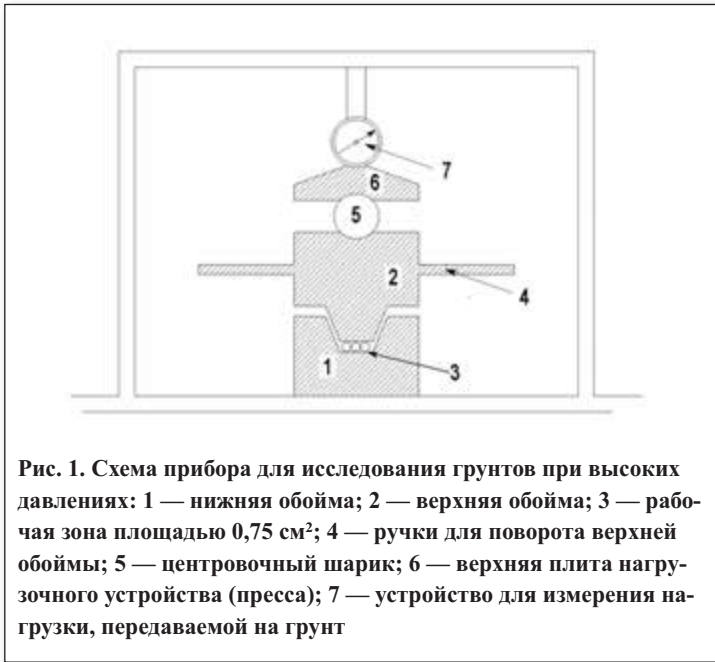
Следует отметить, что определение размера частиц на данном приборе осуществляется следующим образом: сначала происходит диспергирование, затем — измерение частиц с целью определения гранулометрического состава грунта. Однако наблюдавшееся уменьшение  $\Phi_{<0,1}$  свидетельствует о том, что не все частицы в процессе диспергирования разрушаются до размера «первичных» частиц, поэтому фактически на выходе получался микроагрегатный, а не гранулометрический состав грунта. В связи с этим далее в тексте будут использоваться термины «гранулометрический состав» и «микроагрегатный состав» исходя из смысла обсуждаемого вопроса.

## Результаты исследований и их обсуждение

На *первом этапе* работы изучались изменения фракционного состава глинистых грунтов под действием давления в зависимости от их минерального состава.

Содержание фракций в исходных образцах монтмориллонитовой и каолининовой глин по результатам гранулометрических исследований представлено в табл. 1. Изменения фракционного состава глин при увеличении давления показаны на рис. 2.

Корреляционные поля на рис. 2 имеют близкий характер изменений для различных фракций. Однако для фракций каолинита с размером частиц от <0,1 до 2–5 мкм корреляционные поля располагаются над соответствующими полями для монтмориллонита, а для фракции 5–50 мкм — наоборот. Это говорит о том, что давление оказывает различное влияние на формирование фракционного состава каолининовой и монтмориллонитовой глин. То есть изменения содержания фракций в глинах



**Рис. 1.** Схема прибора для исследования грунтов при высоких давлениях: 1 — нижняя обойма; 2 — верхняя обойма; 3 — рабочая зона площадью 0,75 см²; 4 — ручки для поворота верхней обоймы; 5 — центровочный шарик; 6 — верхняя плита нагруженного устройства (пресса); 7 — устройство для измерения нагрузки, передаваемой на грунт

при их сжатии существенно зависят и от минерального состава этих грунтов.

Для подтверждения вывода о влиянии минерального состава глин на формирование их гранулометрического состава были использованы статистические методы в соответствии с работой [2]. Суть данного анализа сводится к следующему. Если минеральный состав влияет на содержание фракций в глинистых грунтах при сжатии, то между выборочными совокупностями данных для каолинитовой и монтмориллонитовой глин будут наблюдаться статистические различия.

Степень различий оценивалась по *t*-критерию Стьюдента. Если его значение  $t_p$ , рассчитанное по результатам измерений, было больше табличного  $t_m = 1,96$  (граничной величины, найденной по таблице критических точек распределения Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $f = n_1 + n_2 - 2 = 703$ , где  $n_1, n_2$  — объемы соответственно первой и второй выборок), то считалось, что минеральный состав влияет на

содержание фракций в глинистом грунте при действии давления.

Результаты расчетов статистик приведены в табл. 2. Как видно из этой таблицы, расчетные значения коэффициента Стьюдента для каждой исследуемой фракции по модулю выше, чем  $t_m = 1,96$ , поэтому можно считать, что минеральный состав оказывает существенное влияние на формирование фракционного состава грунтов при действии давления. Критерий Стьюдента показывает, что различия между выборочными совокупностями для каолинитовой и монтмориллонитовой глин являются статистически значимыми.

Для количественной оценки различий между выборками по каждой фракции был использован линейный дискриминантный анализ<sup>1</sup> (ЛДА). Результаты расчетов для различения выборочных совокупностей приведены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что максимальное различие между каолинитовой и монтмориллонитовой глинами наблюдается для фракций с размером частиц 0,1–0,2 и <0,1 мкм, а минимальное — для фракции 2–5 мкм. Остальные фракции занимают промежуточное положение. Для них модуль *t*-критерия Стьюдента изменяется от 9,1 до 17,8, а общая правильность распознавания выборочных совокупностей находится в пределах 59,9–83,5%. Необходимо отметить, что для преобладающего большинства фракций выборочная совокупность для монтмориллонитовой глины распознается лучше, чем для каолинитовой.

Максимальное отличие каолинитовой глины от монтмориллонитовой наблюдается по комплексному показателю *Z* при совместном анализе всех фракций с помощью пошагового линейного дискриминантного анализа. Выражение для линейной дискриминантной функции *Z* имеет следующий вид:

$$Z = 3,32537 - 7,50608\Phi_{0,1-0,2} + 3,15488\Phi_{0,2-0,5} - 0,93596\Phi_{1-2} + 0,32878\Phi_{2-5} \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции  $r = 0,86$ , критерии «хи-квадрат»  $\chi^2 = 854,3$ , многомерных центрах групп  $Z_K = -1,76$  для каолинитовой глины и  $Z_M = 1,68$  для монтмориллонитовой глины.

Таблица 1

Содержание фракций в исходных образцах глин по результатам гранулометрических исследований			
Группа фракций	Фракция с размером частиц, мкм	Содержание фракции $\Phi, \%$	
		Каолинитовая глина	Монтмориллонитовая глина
Глинистые фракции	<0,1	1,22	0,48
	0,1–0,2	5,54	0,77
	0,2–0,5	14,8	2,66
	0,5–1,0	30,10	8,30
	1,0–2,0	41,22	17,73
	2,0–5,0	6,42	32,95
Пылеватая фракция	5,0–50,0	1,22	37,11

<sup>1</sup> *Линейный дискриминантный анализ (ЛДА)* — нахождение линейных комбинаций признаков для наилучшего различения (дискриминации, распознавания, разделения) двух выборок. Формально задача ЛДА заключается в том, чтобы по данным многомерных наблюдений из двух заранее заданных выборок 1 и 2, которые являются обучающими, построить такую линейную дискриминантную функцию, которая позволила бы многомерные наблюдения из третьей выборки отнести либо к выборке 1, либо к выборке 2. ЛДА позволяет также оценить «качество» обучающей выборки.

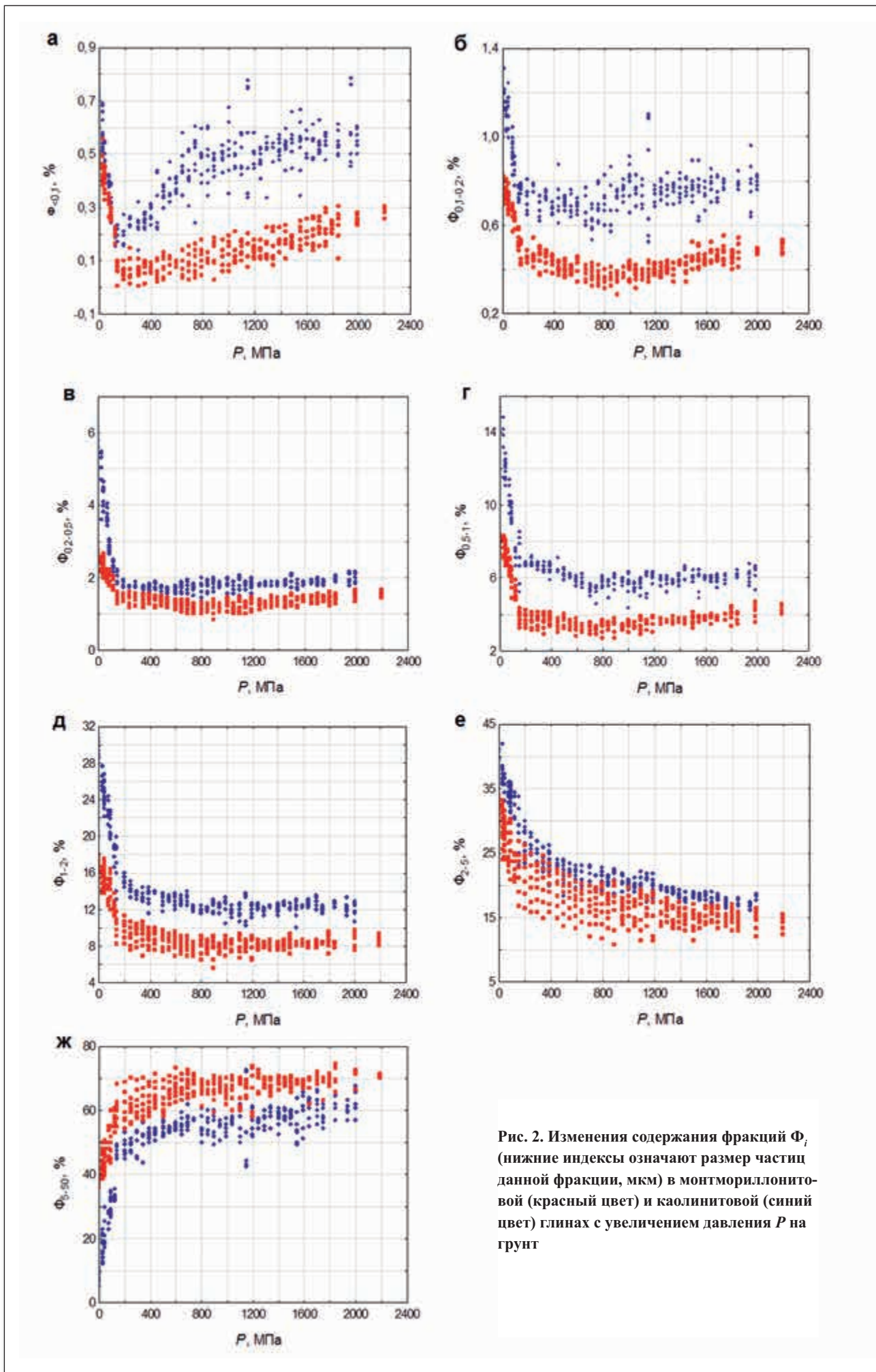


Рис. 2. Изменения содержания фракций  $\Phi_i$  (нижние индексы означают размер частиц данной фракции, мкм) в монтмориллонитовой (красный цвет) и каолинитовой (синий цвет) глинах с увеличением давления  $P$  на грунт

Статистические характеристики исследованных глинистых грунтов									
Группа фракций	Фракция с размером частиц, мкм	Среднее содержание фракции и стандартное отклонение, %				Значение критерия Стьюдента, рассчитанное по результатам измерений	Правильность распознавания выборочной совокупности по результатам линейного дискриминантного анализа, %		
		каолинистая глина		монтмориллонитовая глина			каолинит. глина	монтморил. глина	общее (каоил. гл. + монт. гл.)
		среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.				
Глинистые фракции	<0,1	0,449	0,139	0,180	0,120	25,911	80,0	85,9	83,0
	0,1–0,2	0,787	0,148	0,471	0,122	29,197	93,4	85,0	89,1
	0,2–0,5	2,184	0,938	1,508	0,397	11,801	42,3	83,4	63,3
	0,5–1,0	6,961	2,291	4,262	1,420	17,771	83,6	83,4	83,5
	1,0–2,0	14,637	4,538	9,673	2,798	16,526	67,5	82,1	75,0
	2,0–5,0	23,203	6,637	18,812	5,329	9,134	44,6	74,6	59,9
Пылеватая фракция	5,0–50,0	49,961	13,960	62,695	9,197	-13,511	58,4	81,8	70,4

Расчеты, выполненные по данной функции, свидетельствуют о том, что степень различия между выборками для каолинитовой и монтмориллонитовой глин максимальна по комплексному показателю  $Z$ , по критерию Стьюдента и по правильности распознавания (как по суммарной, так и для каждого класса) (см. табл. 2).

Таким образом, экспериментально установлено и статистически подтверждено, что формирование микроагрегатного состава каолинитовых и монтмориллонитовых глин при сжатии со сдвигом протекает по разным сценариям. Это можно объяснить с позиций строения кристаллических решеток глинистых минералов.

Кристаллическая решетка каолинита состоит из двухслойных элементарных пакетов, в каждом из которых на один слой алюмоокислородных октаэдров приходится один слой кремнекислородных тетраэдров. Они соединяются между собой водородными связями, прочность которых составляет 5–40 кДж/моль [9], поэтому в общем случае кристалл каолинита обладает достаточной жесткостью.

Кристаллическая решетка монтмориллонита состоит из трехслойных пакетов, каждый из которых содержит две кремнекислородные тетраэдрические сетки и размещенную между ними алюмоокислородную октаэдрическую сетку. Эти элементарные пакеты соединяются между собой через атомы кислорода, и между ними действуют лишь вандерваальсовы силы. Прочность этих сил межмолекулярного взаимодействия в два и более раз ниже, чем прочность водородных связей. Благодаря этому жесткость кристалла монтмориллонита ниже, чем у каолинита.

Следовательно, при приложении вертикальной нагрузки и сдвиге процессы агрегации и диспергации в монтмориллонитовых глинах протекают интенсивнее по сравнению с каолинистыми. Это приводит к тому, что содержание глинистой фракции в каолинистой глине изменяется менее значительно, чем в монтмориллонитовой.

На *втором этапе* изучалось влияние давления на общие закономерности изменений микроагрегатного состава глин (производилось выделение классов).

Таблица 3

**Табличные коэффициенты парной корреляции  $r_m$  для классов 1–3 при соответствующих уровнях значимости  $\alpha$  и объемах выборок  $n$**

Класс	Давление $P$ , МПа	$r_m$	$\alpha$	$n$
1	0–125	0,25	0,05	61
2	150–750	0,20	0,05	91
3	800–2 200	0,17	0,05	167

Изменения фракционного состава глин при увеличении давления  $P$  показаны на рис. 2. Видно, что при возрастании  $P$  до 125 МПа наблюдается существенное уменьшение содержания глинистых фракций (с размером частиц менее 5 мкм) и увеличение доли пылеватой фракции (5–50 мкм). При повышении давления до 750 МПа содержание глинистых фракций изменяется разнонаправленно, а доля пылеватой фракции возрастает. При дальнейшем увеличении  $P$  до 2 200 МПа содержание глинистых фракций повышается, а доля пылеватой фракции изменяется хаотично.

Таким образом, на качественном уровне можно предположить, что давление оказывает существенное влияние на формирование гранулометрического состава глинистых грунтов. При этом были установлены два граничных давления — 125 и 750 МПа, при которых интенсивность протекания процессов агрегации и диспергации различна.

Для подтверждения высказанного предположения о наличии граничных давлений использовали линейный дискриминантный анализ, суть которого сводится к тому, что если границы между классами установлены правомерно, то между ними (классами) должна наблюдаться максимальная распознаваемость. Для этого по критерию «давление» всю выборочную совокупность разделили на три класса. В класс 1 вошли экспериментальные данные (с объемом выборки  $n = 61$ ), полученные при  $P = 0 \div 125$  МПа. В класс 2 — данные ( $n = 91$ ), полученные

при  $P = 150 \div 750$  МПа. В класс 3 — данные ( $n = 167$ ), полученные при  $P = 800 \div 2200$  МПа.

Для каждого типа глин (каолинитовой и монтмориллонитовой) было составлено по две дискриминантных функции: первая — для обоснования границы между классами 1 и 2 ( $Z_{1-2}$ ); вторая — для обоснования границы между классами 2 и 3 ( $Z_{2-3}$ ). В расчетах использовались данные по фракционному составу глин.

Для каолинитовой глины были получены следующие линейные дискриминантные функции:

для различения вышеперечисленных классов 1 и 2:

$$Z_{K,1-2} = -43,0310 - 3,0265\Phi_{<0,1} - 1,0016\Phi_{0,1-0,2} + 1,9803\Phi_{0,2-0,5} + 1,5040\Phi_{0,5-1} - 0,3170\Phi_{1-2} + 0,2595\Phi_{2-5} + 0,6258\Phi_{5-50}, \quad (2)$$

где многомерные центры классов 1 и 2 равны соответственно  $Z_{K,1} = -4,54344$  и  $Z_{K,2} = 2,79596$ ;  $r = 0,96$ ;  $\chi^2 = 52,01$ ;

для различения вышеперечисленных классов 2 и 3:

$$Z_{K,2-3} = -32,4909 + 21,3266\Phi_{<0,1} + 11,5974\Phi_{0,1-0,2} + 9,8014\Phi_{0,2-0,5} + 1,0194\Phi_{0,5-1} - 1,7571\Phi_{1-2} + 0,6667\Phi_{2-5} - 0,0143\Phi_{5-50}, \quad (3)$$

где многомерные центры классов 2 и 3 равны соответственно  $Z_{K,2} = -3,26488$  и  $Z_{K,3} = 1,8437$ ;  $r = 0,93$ ;  $\chi^2 = 60,96$ .

Для монтмориллонитовой глины линейные дискриминантные функции имеют следующий вид:

для различения вышеперечисленных классов 1 и 2:

$$Z_{M,1-2} = -38,8093 - 0,7017\Phi_{<0,1} - 3,0345\Phi_{0,1-0,2} - 1,6975\Phi_{0,2-0,5} + 1,7205\Phi_{0,5-1} + 2,4931\Phi_{1-2} - 0,4997\Phi_{2-5} + 0,3155\Phi_{5-50}, \quad (4)$$

где многомерные центры классов 1 и 2 равны соответственно  $Z_{M,1} = 5,17712$  и  $Z_{M,2} = -3,58416$ ;  $r = 0,98$ ;  $\chi^2 = 50,55$ .

для различения вышеперечисленных классов 2 и 3:

$$Z_{M,2-3} = 61,7964 + 41,3331\Phi_{<0,1} - 6,8428\Phi_{0,1-0,2} - 12,5794\Phi_{0,2-0,5} + 2,2471\Phi_{0,5-1} - 0,2790\Phi_{1-2} - 0,5695\Phi_{2-5} - 0,6605\Phi_{5-50}, \quad (5)$$

где многомерные центры классов 2 и 3 равны соответственно  $Z_{M,2} = -2,96914$  и  $Z_{M,3} = 1,60828$ ;  $r = 0,91$ ;  $\chi^2 = 56,69$ .

Расчеты, выполненные по полученным дискриминантным функциям, показали, что правильность распознавания всех выборок составляет 98%.

Таким образом, доказано, что граничные значения давления 125 и 750 МПа были выбраны обоснованно. Это свидетельствует о том, что в каждом классе интенсивность протекания процессов агрегации и диспергации различна, поэтому и условия формирования фракционного состава глин также имеют индивидуальную специфику в разных случаях.

На **третьем этапе** изучалось влияние давления на микроагрегатный состав глин в рамках выделенных классов (внутри классов). Для этого использовали корреляционный анализ, суть которого сводится к следующему. Если между фракционным составом глин и давлением есть корреляционная связь ( $r_p > r_m$ , где  $r_p$  — коэффициент парной корреляции, рассчитанный по полученным дан-

ными;  $r_m$  — критический табличный коэффициент парной корреляции), то считаем, что давление оказывает влияние на формирование микроагрегатного состава глин. Использованные табличные значения  $r_m$  при соответствующих уровнях значимости  $\alpha$  и объемах выборок  $n$  представлены в табл. 3.

Рассмотрим результаты корреляционного анализа для каждого класса.

В *классе 1* ( $P = 0 \div 125$  МПа) среднее содержание глинистых фракций меньше, чем в исходной пробе (табл. 4). Это изменение связано, вероятно, с процессами агрегации глинистых частиц, результатом которых явилось увеличение содержания пылеватой фракции с размером частиц 5–50 мкм.

Между давлением и содержанием фракций были установлены корреляционные связи, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты парной корреляции  $r$  (см. табл. 3).

Наличие отрицательных коэффициентов корреляции между давлением  $P$  и содержанием глинистых фракций ( $\Phi_{<5}$ ) подтверждает вывод авторов о том, что  $\Phi_{<5}$  уменьшается с увеличением  $P$ .

Положительные же коэффициенты корреляции между давлением  $P$  и содержанием пылеватой фракции ( $\Phi_{5-50}$ ) говорят о том, что  $\Phi_{5-50}$  возрастает с увеличением  $P$ .

Для оценки степени влияния давления на содержание исследуемых фракций был использован угловой коэффициент  $k$ , который представляет собой тангенс угла наклона прямой, соответствующей уравнению корреляционной связи между давлением и содержанием фракции. Этот показатель можно интерпретировать следующим образом: чем выше его значение, тем большее влияние оказывает давление на содержание исследуемой фракции. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Из рисунка 3 видно, что с уменьшением размера частиц влияние давления на содержание фракций уменьшается. При этом наиболее чувствительной к давлению является пылеватая фракция 5–50 мкм, а наименее чувствительной — глинистая фракция с размером частиц  $<0,1$  мкм. Следует отметить, что из всех глинистых фракций в наибольшей степени чувствительны к давлению фракции 1–2 и 2–5 мкм монтмориллонитовой и каолинитовой глины соответственно.

Скорость изменения содержания глинистых фракций при увеличении давления в каолинитовой глине выше по сравнению с монтмориллонитовой, о чем свидетельствуют более высокие значения показателя  $k$  (см. рис. 3).

В *классе 2* ( $P = 150 \div 750$  МПа), так же как и в классе 1, с ростом давления наблюдается увеличение доли пылеватой фракции  $\Phi_{5-50}$  (в связи с агрегацией глинистых частиц) и уменьшение содержания глинистых фракций  $\Phi_{<5}$  (но кроме фракции с размером частиц  $<0,1$  мкм, содержание которой возрастает с увеличением давления, что обусловлено диспергацией других фракций) (см. табл. 4).

Между давлением и содержанием фракций были установлены корреляционные связи, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты парной корреляции (см. табл. 4). Это говорит о том, что давление существенно влияет на формирование фракционного состава глин. Наибольшее влияние оно оказывает на содержание фракции 5–50 мкм, а наименьшее — на долю фракции 0,1–0,2 мкм (см. рис. 3).

Основные статистические характеристики для исследованных глин*												
Группа фракций	Фракция с размером частиц, мкм	Класс	Каолинитовая глина					Монтмориллонитовая глина				
			$\bar{x}$	$\sigma$	$r$	$a$	$k$	$\bar{x}$	$\sigma$	$r$	$a$	$k$
Глинистые фракции	<0,1	1	0,44	0,18	-0,98	0,7163	-0,0043	0,37	0,09	-0,93	0,5047	-0,0023
		2	0,32	0,11	0,83	0,1013	0,0005	0,07	0,04	0,36	0,0395	0,000069
		3	0,52	0,076	0,34	0,4190	0,000074	0,17	0,06	0,77	-0,0047	0,0001
	0,1–0,2	1	1,01	0,17	-0,95	1,2735	-0,0042	0,69	0,08	-0,87	0,8030	-0,0019
		2	0,70	0,06	-0,46	0,7638	-0,0001	0,42	0,05	-0,70	0,4976	-0,0002
		3	0,76	0,081	0,18	0,7033	0,000041	0,42	0,05	0,81	0,2618	0,0001
	0,2–0,5	1	3,90	1,11	-0,97	5,5854	-0,027	2,23	0,29	-0,80	2,5963	-0,0064
		2	1,74	0,14	-0,29	1,8336	-0,0002	1,36	0,15	-0,62	1,5705	-0,0005
		3	1,85	0,134	0,38	1,6461	0,0001	1,33	0,15	0,69	0,9355	0,0003
	0,5–1,0	1	11,20	2,44	-0,96	14,8988	-0,0591	6,96	0,99	-0,88	8,3198	-0,0236
		2	6,27	0,67	-0,78	7,5343	-0,0028	3,53	0,36	-0,55	4,0035	-0,001
		3	5,90	0,383	0,35	5,3675	0,0004	3,67	0,34	0,75	2,7079	0,0007
1,0–2,0	1	23,43	3,60	-0,94	28,7528	-0,085	14,97	1,67	-0,71	16,8207	-0,0322	
	2	13,66	1,44	-0,68	16,0368	-0,0052	8,87	1,11	-0,59	10,4361	-0,0035	
	3	12,18	0,647	0,08	11,9696	0,0002	8,18	0,64	0,32	7,4068	0,0006	
2,0–5,0	1	35,72	2,85	-0,86	39,5856	-0,0617	27,67	3,51	-0,73	31,6779	-0,0697	
	2	23,38	3,18	-0,81	29,6140	-0,0137	19,14	3,23	-0,55	23,3908	-0,0094	
	3	18,86	1,569	-0,79	23,6591	-0,0035	15,40	1,92	-0,34	17,8553	-0,0018	
Пылеватая фракция	5,0–50,0	1	23,02	8,70	0,93	10,2629	0,2036	46,31	6,32	0,80	38,3612	0,1381
		2	52,57	3,69	0,81	45,3052	0,0159	64,07	4,65	0,57	57,6770	0,0142
		3	57,69	4,831	0,47	48,7852	0,0065	67,93	2,93	0,42	63,3412	0,0033

\*  $\bar{x}$  — среднее значение для содержания фракции в гле, %;  $\sigma$  — стандартное отклонение, %;  $r$  — коэффициент корреляции,  $a$  — свободный член в уравнении корреляционной связи,  $k$  — угловой коэффициент (тангенс угла наклона прямой, соответствующей уравнению корреляционной связи между давлением и содержанием фракции).

Таблица 5

Коэффициенты парной корреляции между давлением и площадью активной поверхности частиц глинистых грунтов*						
	Площадь активной поверхности частиц $S$					
	каолинитовой глины в классах			монтмориллонитовой глины в классах		
	1	2	3	1	2	3
Давление $P$	-0,98	-0,55	0,25	-0,88	-0,61	0,70

Из всех глинистых фракций наиболее чувствительной к давлению является фракция с размером частиц 2–5 мкм. При этом давление оказывает большее влияние на каолинитовую глину, чем на монтмориллонитовую, о чем свидетельствуют более высокие значения показателя  $k$ .

В классе 3 ( $P = 800 \div 2\ 200$  МПа) влияние давления на формирование фракционного состава глин принципиально отличается от такового для классов 1 и 2. С увеличением давления содержание всех фракций, кроме  $\Phi_{2-5}$ , возрастает, на что указывают положительные значения  $r$ .

Между давлением и содержанием фракций были установлены корреляционные связи, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты парной корреляции (см. табл. 4). Наибольшее влияние давление оказывает на  $\Phi_{5-50}$ , а наименьшее — на  $\Phi_{<0,1}$ .

Из всех глинистых фракций, как и в предыдущих классах, наиболее чувствительной к давлению является фракция 2–5 мкм. Давление при этом также оказывает более существенное влияние на каолинитовую глину, чем на монтмориллонитовую. Это подтверждают более высокие значения показателя  $k$ .

Таким образом, с увеличением давления наблюдается общая тенденция к снижению содержания глинистой фракции и увеличению доли пылеватой.

Наряду с этой закономерностью в каждом классе были выявлены локальные изменения фракционного состава глин в зависимости от давления. Так, в классе 1 с увеличением  $P$  содержание глинистой фракции  $\Phi_{<5}$  уменьшается, а доля пылеватой фракции  $\Phi_{5-50}$  возрастает. В классе 2 эта закономерность почти такая же, но

наблюдается инверсия для фракции с размером частиц <0,1 мкм ( $\Phi_{<0,1}$  возрастает с увеличением давления). В классе 3 формирование фракционного состава протекает по противоположному по сравнению с классами 1 и 2 сценарию: с увеличением давления содержание всех фракций, кроме  $\Phi_{2-5}$ , возрастает, а доля фракции с размером частиц 2–5 мкм уменьшается.

На *четвертом этапе* изучалось влияние давления на формирование энергетически активной поверхности частиц глинистых грунтов. Расчет активной площади частиц производился на 1 мм<sup>3</sup> глины. Результаты этого исследования приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что с увеличением давления площадь активной поверхности частиц  $S$  и для каолинитовой, и для монтмориллонитовой глины уменьшается. При этом наибольшая скорость уменьшения  $S$  наблюдается в классе 1 при давлениях до 125 МПа. При давлениях более 125 МПа влияние величины  $P$  менее значительно. При этом для монтмориллонитовой глины на качественном уровне наблюдается взаимосвязь между давлением и площадью активной поверхности частиц, а для каолинитовой глины такая взаимосвязь, вероятно, отсутствует.

Для количественной оценки взаимосвязей между  $P$  и  $S$  был проведен корреляционный и регрессионный анализ. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5. Из таблицы видно, что между давлением и площадью активной поверхности частиц глин имеются корреляционные связи, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты парной корреляции. Расчетное значение коэффициента корреляции между площадью активной поверхности частиц глин в классе 3 и давлением ( $r_p = 0,25$ ) больше критического табличного значения ( $r_m = 0,17$ ) при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и объеме выборки  $n = 160$ .

Установленное наличие корреляционных связей позволило разработать математические модели для прогнозирования площади активной поверхности частиц глинистых грунтов  $S$  при воздействии давления  $P$ .

Для монтмориллонитовой глины были рассчитаны следующие модели для классов 1, 2 и 3 соответственно:

$$1) S = 3034,249 - 7,3255P; \quad (6)$$

$$2) S = 1756,509 - 0,4634P; \quad (7)$$

$$3) S = 1219,502 + 0,2241P. \quad (8)$$

Для каолинитовой глины были получены следующие модели для классов 1, 2 и 3 соответственно:

$$1) S = 4939,698 - 17,6411P; \quad (9)$$

$$2) S = 2531,371 - 0,4345P; \quad (10)$$

$$3) S = 2235,140 - 0,0771P. \quad (11)$$

### Выводы

1. Экспериментально установлено, что с увеличением давления на глину наблюдается общая тенденция к уменьшению содержания глинистых фракций и увеличению доли пылевой фракции. В монтмориллонитовой глине эти изменения протекают более интенсивно, чем в каолинитовой.

2. Выявлено, что в диапазоне давлений 0–125 МПа изменение фракционного состава глин протекает более ин-

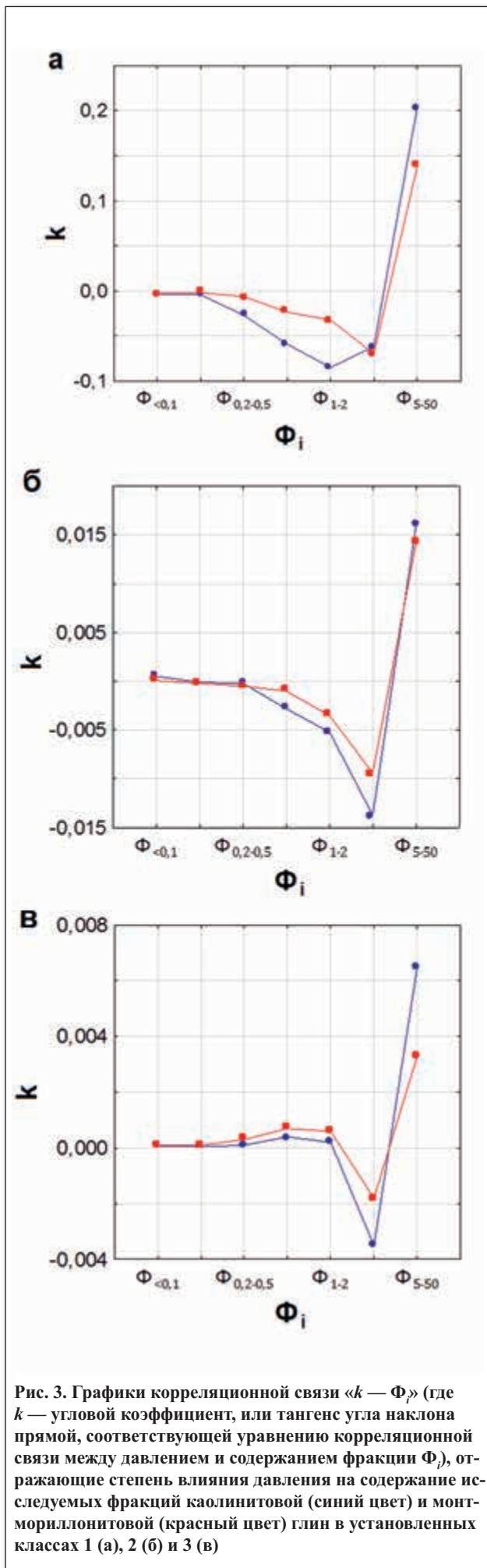


Рис. 3. Графики корреляционной связи « $k$  —  $\Phi_i$ » (где  $k$  — угловой коэффициент, или тангенс угла наклона прямой, соответствующей уравнению корреляционной связи между давлением и содержанием фракции  $\Phi_i$ ), отражающие степень влияния давления на содержание исследуемых фракций каолинитовой (синий цвет) и монтмориллонитовой (красный цвет) глин в установленных классах 1 (а), 2 (б) и 3 (в)



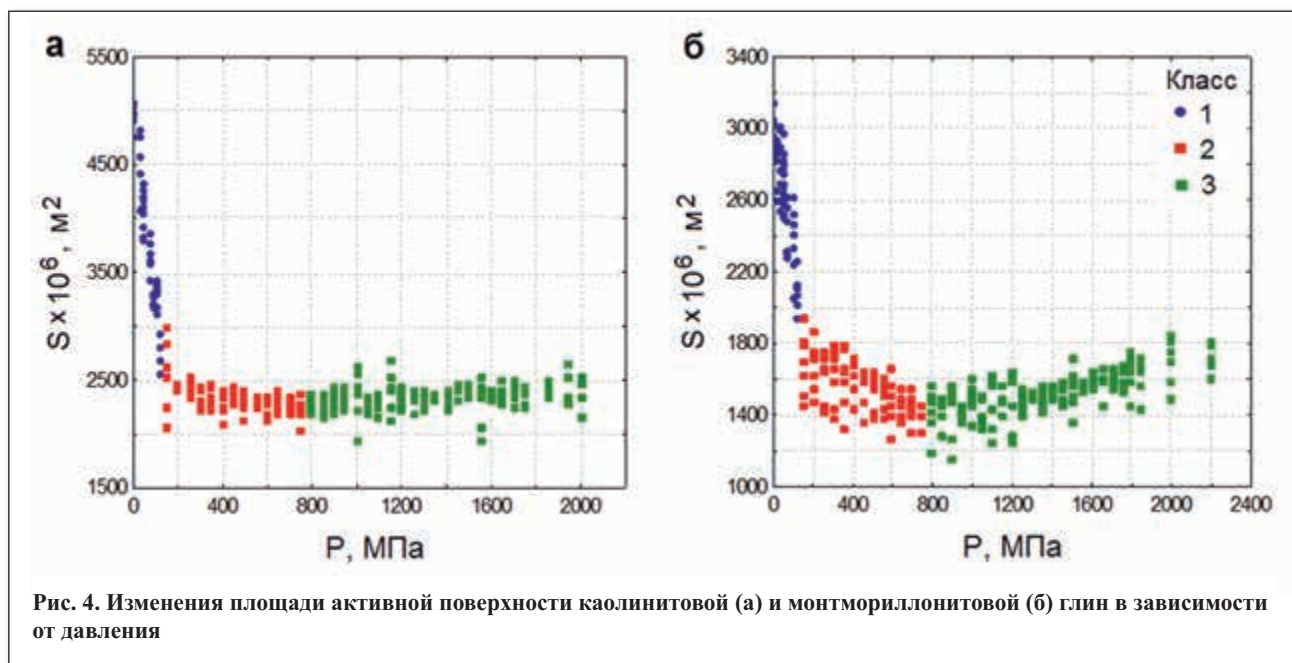



Рис. 4. Изменения площади активной поверхности каолиновой (а) и монтмориллонитовой (б) глин в зависимости от давления

тенсивно, чем при более высоких давлениях. Установлено, что при давлениях 125–750 и 800–2200 МПа также наблюдаются различия в интенсивности формирования фракционного состава глин.

3. Установлено, что с увеличением давления площадь активной поверхности частиц каолиновой и монтмориллонитовой глин уменьшается. При этом наибольшая

скорость уменьшения площади наблюдается при давлениях до 125 МПа. При давлениях более 125 МПа их влияние менее значительно.

4. Разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать площадь активной поверхности частиц глинистых грунтов в зависимости от их сжатия. 

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

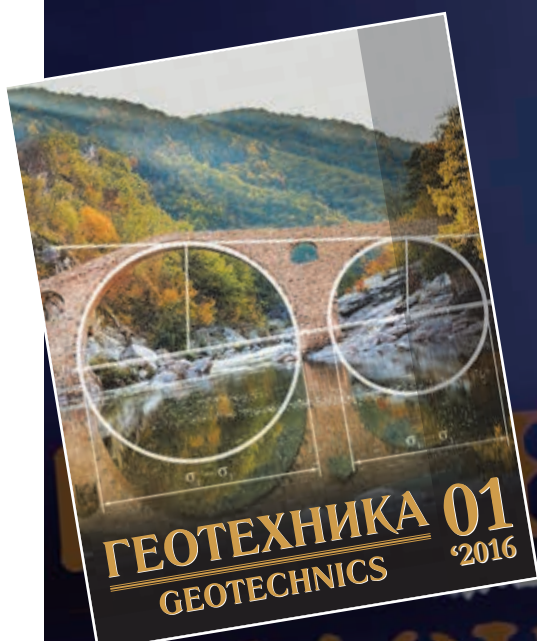
1. Бойко В.Ф., Верхотуров А.Д., Еришова Т.Б., Власова Н.М. Зависимость гранулометрических характеристик дисперсного брусита от срока хранения // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 6. С. 47–49.
2. Галкин В.И., Силайчева В.А. Разработка статистической модели прогноза коэффициента проницаемости по совокупности геологических и технологических показателей // Нефтепромысловое дело. 2013. № 9. С. 10–12.
3. Ениколопян Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. Сверхбыстрые реакции разложения в твердых телах под давлением // Доклады АН СССР. 1986. Т. 288. № 3. С. 657–660.
4. Королев В.А. Моделирование гранулометрического состава лунных грунтов // Инженерная геология. 2016. № 5. С. 40–50.
5. Кривошеева З.А., Злочевская Р.И., Королев В.А., Сергеев Е.М. О природе изменения состава и свойств глинистых пород в процессе литогенеза // Вестник Московского университета. Сер. Геология. 1977. № 4. С. 60–73.
6. Крыленко В.В., Крыленко М.В. Исследования значимости и взаимосвязей природных факторов формирования гранулометрического состава отложений и рельефа аккумулятивных береговых форм Черного моря // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 669–675.
7. Куксенко В.С., Махмудов Х.В., Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск, 2009. № 4. С. 55–59.
8. Лебедев И.П. Реконструкция минерального состава раннепротерозойских глин Воронцовской серии ВКМ // Глины и глинистые минералы: материалы международной научной конференции. Воронеж, 2004. С. 83–85.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
10. Осовецкий Б.М. Дробная гранулометрия аллювия. Пермь: Изд-во Пермского университета, 1993. 343 с.
11. Пургина Д.В. Связь между пределом текучести и гранулометрическим составом глинистых грунтов правобережья р. Томи // Проблемы геологии и освоения недр: материалы 16-го Международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири. Томск, 2012. С. 484–486.
12. Савко А.Д., Свиридов В.А. Эволюция минерального состава глин в зависимости от условий их седиментации и диагенеза (на примере кайнозойских отложений Воронежской антеклизы) // Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы 8-го Всероссийского литологического совещания. М., 2015. С. 293–296.

13. *Сергеев Е.М.* К вопросу уплотнения пылеватого грунта большими нагрузками // Вестник Московского университета. 1946. № 1. С. 91–93.
14. *Сергеев Е.М.* Сжимаемость крупнообломочных и песчаных грунтов // Избранные главы общего грунтоведения. М.: Изд-во Московского университета, 1946. 207 с.
15. *Середин В.В.* К вопросу о прочности засоленных глинистых грунтов // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 66–69.
16. *Середин В.В., Каченов В.И., Ситева О.С., Паглазова Д.Н.* Изучение закономерностей коагуляции глинистых частиц // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. Ч. 14. С. 3189–3193.
17. *Середин В.В., Ядзинская М.Р.* Исследования механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8. Ч. 6. С. 1408–1412.
18. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский В.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С.* Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
19. *Чиков Б.М., Каргаполов С.А., Ушаков Г.Д.* Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. 1989. № 6. С. 75–79.
20. *Шлыков В.Г.* Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. М.: ГЕОС, 2006. 176 с.
21. Laser particle sizer “Analysette 22” (NanoTec/MicroTec/XT): operating instructions. Idar-Oberstein, Germany: Fritsch GmbH, 2004. URL: [http://www.johnmorris.com.au/files/product/attachments/5613/268093\\_manual\\_instr.pdf](http://www.johnmorris.com.au/files/product/attachments/5613/268093_manual_instr.pdf).
22. *Seredin V.V., Rastegayev A.V., Panova E.G., Medvedeva N.A.* Changes in physical-chemical properties of clay under compression // International Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 4. № 3. P. 22–29.

# ГЕОТЕХНИКА

Журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — ознакомление российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники



Периодичность в 2017 году:  
**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:  
**3900 рублей**  
[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)