

УДК 622.276+622.361.1:544.638

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА ГЛИН, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЖАТИЮ

Н.А. Медведева, К.А. Алванян, Ю.О. Мальгина, В.В. Середин

Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15)

## ZETA POTENTIAL CHANGING IN COMPRESSED CLAYS

Natalia A. Medvedeva, Karine A. Alvanyan, Yulia O. Malgina, Valery V. Seredin

Perm State National Research University (15, Bukireva st., Perm, 614068, Russian Federation)

Получена / Received: 10.07.2018. Принята / Accepted: 14.01.2019. Опубликовано / Published: 29.03.2019

### Ключевые слова:

глина, монтмориллонит, каолинит, глинистые частицы, дзета-потенциал, двойной электрический слой, давление, коллоид, минерал, суспензия, структурные связи, гранулометрический анализ, фракция, корреляционный анализ, инженерная геология.

Представлены экспериментальные результаты, касающиеся влияния нагружаемого давления на электрокинетический потенциал частиц каолинита и монтмориллонита, находящихся в водной суспензии. Определено, что исследуемые суспензии каолинита и монтмориллонита агрегативно и седиментационно устойчивы. Об агрегативной устойчивости свидетельствует рассчитанная энергия теплового движения частиц ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  Дж/м<sup>2</sup>). Проведенный мониторинг размеров частиц указывает на седиментационную устойчивость. Было установлено, что изменение электрокинетического потенциала глинистых частиц в зависимости от нагружаемого давления происходит по-разному. Было выделено три класса: 0–125 МПа, 150–750 МПа, 800–1200 МПа. В каждом классе наблюдаются характерные изменения электрокинетического потенциала, обусловленные природой глины и фракционным составом. Фракционный состав также подвержен изменению в ходе сжатия глин. Нагрузка давлением по-разному оказывает влияние на изменение электрокинетического потенциала для каолинита и монтмориллонита. Для установления влияния гранулометрического состава на условия формирования дзета-потенциала на поверхности глинистых частиц был проведен статистический корреляционный анализ. Установлено, что для монтмориллонита в 1-м и 2-м классах гранулометрический состав и дзета-потенциал имеют статистические связи, а в классе 3 – нет, тогда как для каолинита между гранулометрическим составом и дзета-потенциалом наблюдаются статистические связи в 1-м и 3-м классах, а во 2-м связь отсутствует. Полученные изменения дзета-потенциала связаны с процессами диспергации и агрегации, которые реализуются интенсивнее при невысоких давлениях ( $p < 150$  МПа).

### Key words:

clay, montmorillonite, kaolinite, clay particles, zeta potential, EDL, pressure, colloid, mineral, suspension, structural bonds, particle size analysis, fraction, correlation analysis, engineering geology.

Experimental results concerning the effect of loading pressure on the electrokinetic potential of kaolinite and montmorillonite particles in aqueous suspension are presented. It has been determined that the investigated suspensions of kaolinite and montmorillonite are aggregatively and sedimentally stable. The aggregative stability is evidenced by the calculated energy of the molecular motion ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  J/m<sup>2</sup>). The particle size monitoring indicates sedimentation stability. It was found that the change in the electrokinetic potential of clay particles depends on the loading pressure in different ways. Three classes were distinguished: 0–125 MPa, 150–750 MPa, 800–1200 MPa. In each class, changes in the electrokinetic potential are observed, due to the nature of the clay and the fractional composition. The fractional composition of the clay is also changed while compression. Pressure load has a different effect on the change in electrokinetic potential for kaolinite and montmorillonite. To establish the influence of the particle size distribution on the conditions of formation of the zeta potential on the surface of clay particles, a statistical correlation analysis was performed. It was established that for montmorillonite in the 1st and 2nd classes, the particle size distribution and zeta-potential have statistical correlations, and in 3rd class - not, whereas for kaolinite, statistical correlations between the particle size distribution and zeta potential are observed in the 1st and 3rd classes, and in the 2nd class - not. The resulting changes in the zeta potential are associated with the processes of dispersion and aggregation, which are implemented more intensively at low pressures ( $P < 150$  MPa).

Медведева Наталья Александровна – кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии (тел.: +007 902 478 43 11, e-mail: nata-kladova@yandex.ru).

Алванян Карине Антоновна – старший преподаватель кафедры инженерной геологии (тел.: +007 342 239 64 39, e-mail: karishuta@yandex.ru).

Мальгина Юлия Олеговна – магистр кафедры инженерной геологии (тел.: +007 342 239 64 39, e-mail: karishuta@yandex.ru).

Середин Валерий Викторович – профессор, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии (тел.: +007 342 239 64 39, e-mail: seredin@nedra.perm.ru). Контактное лицо для переписки.

Natalia A. Medvedeva (Author ID in Scopus: 55164437300) – PhD in Chemistry, Associate Professor at the Department of Physical Chemistry (tel.: +007 902 478 43 11, e-mail: nata-kladova@yandex.ru).

Karine A. Alvanyan – Senior Lecturer at the Department of Engineering Geology (tel.: +007 342 239 64 39, e-mail: karishuta@yandex.ru).

Yulia O. Malgina – Master's student at the Department of Engineering Geology (tel.: +007 342 239 64 39, e-mail: karishuta@yandex.ru).

Valery V. Seredin (Author ID in Scopus: 56974744000) – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Engineering Geology (tel.: +007 342 239 64 39, e-mail: seredin@nedra.perm.ru). The contact person for correspondence.

## Введение

Свойства глин во многом определяются энергетическим потенциалом, формируемым на поверхности глинистых частиц [1, 2]. Одной из составляющих энергетического потенциала является электрокинетический потенциал (дзета-потенциал), который образуется на границе скольжения между адсорбционным и диффузионным слоями [3]. Дзета-потенциал определяется как зарядом самой частицы, так и внешними условиями среды. Существуют несколько факторов, которые определяют электрический заряд на поверхности глинистых частиц: дефекты в кристаллической решетке [4–13], pH раствора, тип и концентрация катионов в поровом растворе, влияние индифферентных электролитов [9, 14, 15], влияние неиндифферентных электролитов, влияние температуры [15, 16], влияние природы дисперсионной среды [15–17]. Величина заряда частиц существенно влияет на формирование прочностных [18] и адсорбционных свойств глин [19–22], а также на трансформацию жидкости в грунтовом массиве [23]. Так, в статье В.И. Осипова [24] описывается процесс адсорбции молекул воды силикатными поверхностями глинистых минералов, приводящий к формированию наноразмерных по толщине пленок адсорбированной воды.

Изучению электрического заряда частиц дисперсных грунтов и закономерностей его формирования уделяется большое внимание [4–6, 25–27]. Одним из факторов, который определяет, адсорбционную активность глин и, как следствие, заряд частиц, является нагружаемое давление. В результате высоких давлений и давлений со сдвигом в определенных областях твердого вещества создается поле напряжений, релаксация которого происходит по разным каналам: выделение тепла, образование новой поверхности и короткоживущих активных центров, образование пластических волн, взаимодействие которых приводит к

формированию в структуре различного вида дефектов и метастабильных состояний [28–31]. Экспериментальное изучение поведения структур каолинита, галлуазита, монтмориллонита, сепиолита, палыгорскита и иллита под воздействием разных типов давления позволило установить, что степень совершенства структур и распределение межпакетного вещества зависят как от характера межслоевых связей, так и от типа давления [32].

Влияние приложенного давления (техногенной нагрузки) на изменение дзета-потенциала глинистых минералов изучено достаточно слабо, поэтому целью данного исследования является установление закономерности изменения дзета-потенциала в глинах, подверженных сжатию со сдвигом.

Объектами исследования являются лобановский монтмориллонит и челябинский каолинит. По результатам рентгеноструктурного анализа [33] монтмориллонитовая глина состоит из: монтмориллонита (75 %); каолинита (3,6 %), кварца (11,4 %), альбита (6,7 %), кальцита (3,3 %). Каолинитовая глина содержит: каолинит (76,7 %), монтмориллонит (15,6 %), кварц (7,7 %).

Полученную глину подвергали сжатию, которое производили на специально сконструированном и изготовленном приборе по методике, изложенной в работе [34]. Предварительно исследуемые глины отчищали путем отмучивания (седиментационным способом) 2%-ных водных суспензий глин. Для прессования использовали образцы глин с фракциями более 0,01 мм.

Для исследований брали суспензии с содержанием глины 0,5 %.

### **Закономерности изменения дзета-потенциала в глинах, подверженных механической обработке давлением**

Определение электрокинетических характеристик (электрокинетического потенциала) глин в воде, а также структурных параметров (размера частиц)

осуществляли с помощью автоматизированной системы для исследования электрокинетических свойств коллоидных систем и поверхностей DelsaNanoC фирмы Beckman Coulter (США). Измерение размера частиц проводили в ячейке с кварцевой кюветой, а дзета-потенциала частиц – в проточной ячейке. В основе измерений размеров частиц и электрокинетических характеристик лежат методы фотонно-корреляционной спектроскопии (PCS), основанные на принципе динамического рассеяния света и электрофоретического светорассеяния [35].

Одновременно с измерением размера частиц и дзета-потенциала исследуемых глинистых суспензий проводили мониторинг структурных параметров во времени. Критерием при данных измерениях служило время аккумуляции (accumulation times), которое характеризует накопление данных и выражается в условных единицах [1]. Определение полидисперсности (П) осуществлялось на основании распределения интенсивности в зависимости от размеров частиц.

Один из важных факторов при измерении электрокинетических характеристик – это устойчивость систем. В данном случае речь идет как об агрегативной устойчивости, так и о седиментационной. Достижение седиментационной устойчивости исследуемых систем суспензий глин подтверждали результатами мониторинга размеров частиц во времени (рис. 1).

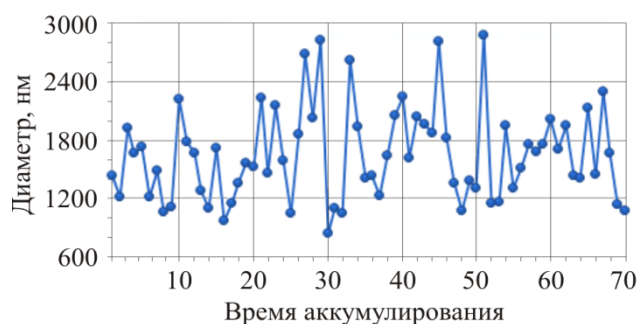


Рис. 1. Мониторинг размеров частиц монтмориллонитовой глины в воде

Для того чтобы оценить агрегативную устойчивость частиц глинистых минералов, была рассчитана энергия теплового движения частиц

$$\sigma_m = \gamma \frac{kT}{d^2},$$

где  $\gamma \sim 10$  – безразмерный коэффициент;  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  – температура, К;  $d$  – размер структурной единицы, м [37].

Данная характеристика применяется в качестве критерия агрегативной устойчивости, для вычисления которого был определен средний диаметр глинистых частиц в водной суспензии. Для некоторых давлений результаты отражены в табл. 1.

Таблица 1

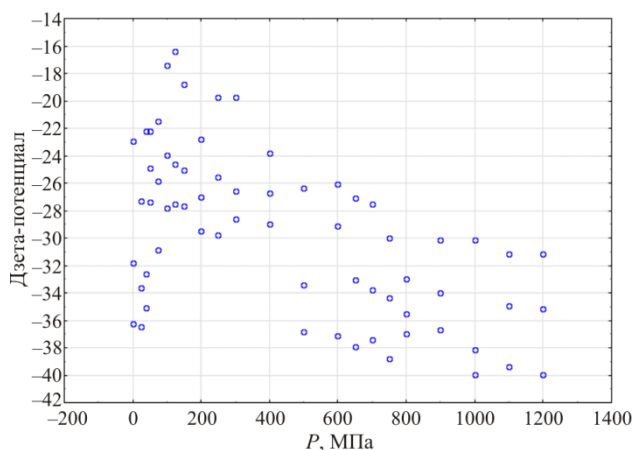
Изменение среднего диаметра, полидисперсности и энергии теплового движения частиц глин в зависимости от нагружаемого давления

P, МПа	Каолинит			Монтмориллонит		
	$d_{cp} \cdot 10^9$ , м	П	$\sigma_m \cdot 10^8$ , Дж/м <sup>2</sup>	$d_{cp} \cdot 10^9$ , м	П	$\sigma_m \cdot 10^8$ , Дж/м <sup>2</sup>
0	720 ± 15	0,30	7,93	800 ± 59	0,34	6,43
60	883 ± 85	0,36	5,26	680 ± 40	0,28	8,88
105	776 ± 90	0,32	6,81	877 ± 23	0,24	5,34
200	592 ± 63	0,30	11,71	1023 ± 85	0,35	3,92
550	1450 ± 100	0,34	1,96	714 ± 47	0,20	8,06

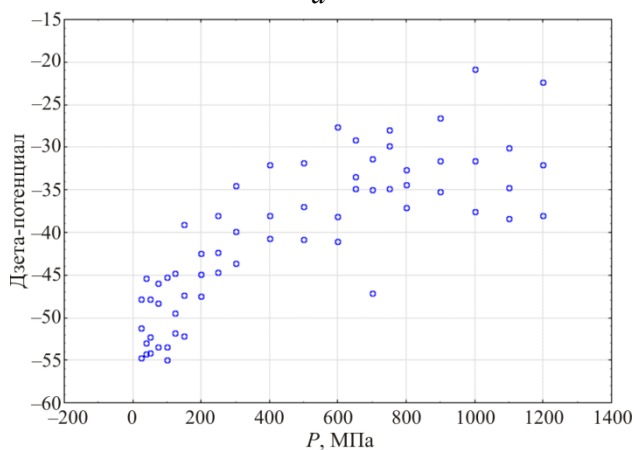
Необходимо отметить, что наряду с наноразмерными частицами отмечается наличие их агломератов, а также зерен микронного диапазона, что характерно для диспергированных систем. Эти крупные частицы не могут быть определены, так как они не обладают седиментационной устойчивостью (быстро оседают) и в процессе измерения не находятся во взвешенном состоянии [36, 37]. Рассчитанные значения  $\sigma_m$  находятся в диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$  Дж/м<sup>2</sup>, что указывает на агрегативную устойчивость системы, однако кинетически исследуемые системы являются слабоустойчивыми.

Об однородности системы свидетельствует индекс полидисперсности, значения которого не превышают 0,4.

После проведения серии испытаний были построены графики изменения дзета-потенциала глинистых частиц каолинита и монтмориллонита в зависимости от нагружаемого давления (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Изменение дзета-потенциала ( $\zeta$ ) глинистых частиц, подверженных давлению ( $P$ ): а – поле корреляции дзета-потенциала в зависимости от давления, лобановский монтмориллонит; б – диаграмма рассеивания дзета потенциала в зависимости от давления, каолинит

На рис. 2, а показана зависимость дзета-потенциала от давления монтмориллонитовой глины. Из графика видно, что при давлении от 0 до 125 МПа дзета-потенциал уменьшается по модулю от  $-36$  до  $-16$  мВ.

При давлении от 150 до 750 МПа происходит увеличение по модулю значений дзета-потенциала от  $-18$  до  $-38$  мВ, а при давлении от 800 до 1200 МПа дзета-потенциал изменяется хаотично от  $-30$  до  $-40$  мВ. На рис. 2, б представлена зависимость дзета-потенциала от давления каолиновой глины, на графике можно выделить три области: первая – при давлении от 0 до 125 МПа дзета-потенциал изменяется от  $-55$  до  $-45$  мВ, вторая – от 150 до 750 МПа, где дзета-потенциал возрастает от  $-52$  до  $-30$  мВ. Третья – в диапазоне давлений от 800 до 1200 МПа, в которой дзета-потенциал изменяется хаотично.

Таким образом, предварительно для каждой глины можно выделить три класса в данном диапазоне давлений: 1-й класс – 0–125 МПа, 2-й класс – 150–750 МПа, 3-й класс 800–1200 МПа.

Видно, что нагрузка по-разному оказывает влияние на каолинит и монтмориллонит. Такое обстоятельство может быть обусловлено рядом причин. Во-первых, изоморфными замещениями в кристаллической решетке глинистых минералов: так, для глинистых минералов типа 2:1 (минералы, которые состоят из двух тетраэдрических и одной октаэдрической сеток, к которым относится монтмориллонит) происходят замещения  $\text{Si}^{4+}$  на  $\text{Al}^{3+}$  в тетраэдрическом слое и замещения  $\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  в октаэдрическом слое [6, 9]. Считается, что изоморфные замещения не характерны для каолинита [6], однако ряд авторов отмечает, что в каолините происходят изоморфные замещения  $\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Si}^{4+}$  в тетраэдрических сетках [7, 10]. Известно, что изоморфные замещения оказывают влияние на заряд базальных поверхностей (силоксановую и гидроксильную) глинистых минералов [12]. Структурный слой каолинита имеет силоксановую и гидроксильную поверхности, в то время как у структурного слоя монтмориллонита есть только силоксановые поверхности.

Во-вторых, формирование постоянного структурного заряда также обусловлено электроотрицательностью атомов химических элементов, из которых состоит глинистый минерал [38–41].

В-третьих, фракционный состав. Увеличение содержания мелкодисперсной фракции вследствие механоактивации глин приводит к увеличению абсолютного значения дзета-потенциала [29, 30]. Кроме того, необходимо учитывать неоднородность локализации электрического заряда в разных местах частицы того или иного глинистого минерала.

Таким образом, классы, выделенные для лобановского монтмориллонита по графику зависимости  $R$  от  $P$ , следующие: 1-й класс – 0–125 МПа, 2-й класс – 150–600 МПа, 3-й класс – 650–1200 МПа. Для челябинского каолинита по графику зависимости  $R$  от  $P$  следующие: 1-й класс – 0–125 МПа, 2-й класс – 150–400 МПа, 3-й класс – 500–1200 МПа.

### Влияние гранулометрического состава на условия формирования дзета-потенциала на поверхности глинистых частиц

Для изучения влияния гранулометрического состава на изменение величины дзета-потенциала были построены графики изменения дзета-потенциала глин в зависимости от процентного содержания фракций с размером частиц: менее 0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,5; 0,5–1,0; 1–2; 2–5; 5–50 мкм. Методика определения гранулометрического состава исследуемых глин, подверженных давлению, а также обоснование влияния давления на формирование гранулометрического состава глин изучены нами ранее и описаны в работах [33, 34]. Экспериментально было установлено, что с увеличением давления на глину наблюдается общая тенденция к уменьшению содержания глинистых фракций и увеличению доли пылеватой фракции. В каолиновой глине такого рода изменения протекают более интенсивно, чем

в аргиллитоподобной монтмориллонитовой. Выявлено, что в диапазоне давлений 0–125 МПа изменение фракционного состава глин протекает более интенсивно, чем при более высоких давлениях.

На основании полученных результатов гранулометрического анализа был проведен статистический анализ и выведен коэффициент корреляции для каждой фракции по классам. Результаты обработки для монтмориллонита и каолинита представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между дзета-потенциалом и гранулометрическим составом монтмориллонитовой глины

Фракция	Класс 1		Класс 2		Класс 3	
	$r(n=21)$	$r_t(n=21)$	$r(n=30)$	$r_t(n=30)$	$r(n=15)$	$r_t(n=15)$
Менее 0,1	-0,52	-0,43	-0,36	-0,36	0,13	0,51
0,1–0,2	-0,50	-0,43	0,46	0,36	-0	-0,51
0,2–0,5	-0,59	-0,43	0,70	0,36	-0,42	-0,51
0,5–1	-0,66	-0,43	0,66	0,36	-0,34	-0,51
1–2	-0,48	-0,43	0,69	0,36	-0,51	-0,51
2–5	-0,54	-0,43	0,67	0,36	-0,30	-0,51
5–50	0,69	0,43	-0,60	-0,36	0,33	0,51

Примечание: здесь и в табл. 3 красным выделены незначимые коэффициенты корреляции.

Из табл. 2 видно, что для монтмориллонита в классах 1 и 2 гранулометрический состав и дзета-потенциал имеют статистические связи, так как расчетные коэффициенты корреляции больше табличных значений. В классе 3 связи слабые, что обусловлено отсутствием влияния гранулометрического состава на формирование электрокинетического потенциала.

Необходимо отметить, что в классе 1 (0–125 МПа) с увеличением процентного содержания глинистой фракции (менее 0,1–5 мкм) происходит снижение дзета-потенциала, тогда как с ростом содержания пылеватой фракции (5–50 мкм) значение дзета-потенциала увеличивается. В классе 2 (150–750 МПа) с увеличением процентного содержания фракций 0,1–5,0 мкм наблюдается

рост дзета-потенциала. А с увеличением содержания фракции менее 0,1 и 5–50 мкм значение дзета-потенциала снижается. Предполагается, что увеличение содержания частиц глинистой фракции, которые остаются во взвешенном состоянии, приводит к увеличению дзета-потенциала.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции между дзета-потенциалом и гранулометрическим составом каолинитовой глины

Фракция	Класс 1		Класс 2		Класс 3	
	$r(n=18)$	$r_s(n=18)$	$r(n=30)$	$r_s(n=30)$	$r(n=15)$	$r_s(n=15)$
Менее 0,1	-0,16	-0,47	0,58	0,36	0,18	0,51
0,1–0,2	-0,20	-0,47	-0,15	-0,36	0,26	0,51
0,2–0,5	-0,21	-0,47	-0,66	-0,36	0,34	0,51
0,5–1	-0,24	-0,47	-0,64	-0,36	0,33	0,51
1–2	-0,22	-0,47	-0,72	-0,36	0,28	0,51
2–5	-0,10	-0,47	-0,75	-0,36	-0,16	-0,51
5–50	0,20	0,47	0,61	0,36	0,25	0,51

В классе 3 (800–1200 МПа) с увеличением процентного содержания фракций 0,1–5,0 мкм происходит снижение дзета-потенциала. При увеличении содержания фракции менее 0,1 и 5–50 мкм значение дзета-потенциала увеличивается.

Из табл. 3, в которой представлены результаты статистического анализа для каолинита, следует, что в классах 1 и 3 гранулометрический состав и дзета-потенциал не имеют статистических связей.

В классе 2 между гранулометрическим составом и дзета-потенциалом наблюдаются статистические связи, за исключением фракции 0,1–0,2.

Таким образом, описанные изменения дзета-потенциала могут быть связаны с процессами диспергации и агрегации, которые реализуются интенсивнее при невысоких давлениях ( $P < 150$  МПа). Предполагается, что частицы пылеватой фракции осаждаются, а содержание седиментационно устойчивых частиц глинистой фракции, которые остаются во взвешенном состоянии, уменьшается, что и приводит к падению дзета-потенциала.

## Заключение

Физико-химические свойства грунтов во многом определяются размером их структурных элементов. Величина электрокинетического потенциала является критерием, использование которого позволит прогнозировать структурные изменения глинистых минералов в различных средах.

С увеличением давления на глину электрокинетический потенциал частиц изменяется разнонаправленно. Формирование дзета-потенциала связано как с размерностью частиц, так и с их минеральным составом.

## Библиографический список

1. Середин В.В., Красильников П.А., Медведева Н.А. Изменение электрокинетического потенциала глинистых коллоидов в водной и углеводородной средах // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2017. – № 1. – С. 66–74.
2. Buckley J.S., Takamura K., Morrow N.R. Influence of electrical surface charges on the wetting properties of crude oils // SPE Reservoir Engineering. – 1989. – Vol. 4, iss. 03. – P. 332–340. DOI: 10.2118/16964-PA
3. Yukselen Y., Kaya A. Zeta potential of kaolinite in the presence of alkali, alkaline earth and hydrolyzable metal ions // Water, Air, and Soil Pollution. – 2003. – Vol. 145, № 1–4. – С. 155–168. DOI: 10.1023/A:1023684213383
4. Середин В.В., Паршина Т.Ю., Исаева Г.А. К вопросу об оценке энергетического потенциала глинистых частиц // Вестник Пермского университета. Геология. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 370–381. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.370
5. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1988. – 177 с.
6. Королев В.А., Нестеров Д.С. Физико-химические закономерности изменения электрических зарядов частиц

глинистых грунтов // Инженерная геология. – 2017. – № 4. – С. 50–60. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-50-60

7. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. – Киев: Наукова думка, 1975. – 352 с.

8. Van Olphen H., Fripiat J.J. Data handbook for clay minerals and other non-metallic minerals. – Oxford: Pergamon Press, 1979. – 346 p.

9. Соколова Т.А., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. – Тула: Гриф и К, 2009. – 172 с.

10. Морис П. Поверхность и межфазные границы в окружающей среде. От наноуровня к глобальному масштабу. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 543 с.

11. Characterization of the surface charge distribution on kaolinite particles using high resolution atomic force microscopy / N. Kumar, Cunlu Zhao, Aram Klaassen, Dirkvan den Ende, Frieder Mugele, Igor Siretanu // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2016. – Т. 175. – Р. 100–112. DOI: 10.1016/j.gca.2015.12.003

12. Schoonheydt R.A., Johnston C.T. Surface and interface chemistry of clay minerals // *Developments in clay science*. – 2006. – Т. 1. – Р. 87–113. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01003-2

13. Gupta V., Miller J. D. Surface force measurements at the basal planes of ordered kaolinite particles // *J. Colloid Interface Sci.* – 2010. – Vol. 344, iss. 2. – Р. 362–371. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.01.012

14. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 512 с.

15. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.

16. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства // *Науки о земле*. – 2000. – Т. 6, вып. 9. – С. 59–65.

17. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. – М.: Высш. шк., 2001. – 527 с.

18. Середин В.В., Андрианов А.В. К вопросу о методике определения прочностных характеристик грунтов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – С. 946.

19. Изотерма сорбции ионов стронция монтмориллонит-гидрослюдистыми глинами / Л.Ф. Голдовская-Перистая [и др.] // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2011. – Т. 11, № 2. – С. 165–171.

20. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Медь // *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы*. – 2013. – № 100. – С. 3–93.

21. Михайлов Н.Н., Сечина Л.С., Моторова К.А. Роль глинистых минералов в образовании адсорбционно-связанной нефти в породах-коллекторах углеводородного сырья // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*. – 2012. – № 1(5). – С. 51.

22. Иванова Е.С. Возможности прогнозирования сорбционной активности природной глины // *Известия РГПУ им. А.И. Герцена. Химия*. – 2013. – № 157. – С. 90–95.

23. Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. Исследование распределения углеводородов по разрезу грунтового массива. Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–14. – С. 3100–3104.

24. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2011. – № 4. – С. 291–305.

25. Королев В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – М.: Сам полиграфист, 2015. – 468 с.

26. Нестеров Д.С., Королев В.А. О влиянии pH среды на электрический

заряд частиц глинистых грунтов // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых): в 2 т. – Пермь: Пермск. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. – Т. 1. – С. 451–454.

27. Лин-Гуан-цан, Фридрихсберг Д.А. Исследование электрокинетического потенциала в зависимости от температуры и других факторов // Вестник Ленинградского государственного университета. – 1963. – № 16, вып. 3. – С. 88.

28. Авакумов Е.Г., Болдырев В.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 343 с.

29. Исследование изменения электростатических характеристик глин Таганского месторождения от степени механоактивации [Электронный ресурс] / П.О. Юрьев, И.В. Костин, Е.В. Рассказова, В.В. Цэрна // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html> (дата обращения: 10.06.2018).

30. Role of surface area, primary particle size, and crystal phase on titanium dioxide nanoparticle dispersion properties / K. Suttiponpanit, J. Jiang, M. Sahu, S. Suvachittanont, T. Charinpanitkul, P. Biswas // *Nanoscale Res Lett.* – 2011. – Vol. 6, № 1. – P. 27. DOI: 10.1007/s11671-010-9772-1

31. Франк-Каменецкий В.А., Котов Н.В., Гойло Э.А. Трансформационные преобразования слоистых силикатов при повышенных  $p$ – $T$ -параметрах / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Ленингр. гос. ун-т. Науч.-исслед. ин-т земн. коры. – Л.: Недра, 1983. – 151 с.

32. Гойло Э.А. Кристаллохимия трансформаций слоистых силикатов: автореф.

дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 04.00.20 / Санкт-Петербургский гос. ун-т. – СПб., 1997. – 70 с.

33. Влияние давления и гранулометрического состава на энергетическую активность глин / В.В. Середин, А.В. Растегаев, В.И. Галкин, Т.Ю. Паршина, Г.А. Исаева // *Инженерная геология.* – 2017. – № 4. – С. 62–71. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-62-71

34. Влияние давления на площадь активной поверхности глинистых грунтов / В.В. Середин, А.В. Растегаев, Н.А. Медведева, Т.Ю. Паршина // *Инженерная геология.* – 2017. – № 3. – С. 18–27. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-3-18-27

35. ISO 13099-2:2012. Colloidal systems – Methods for zeta-potential determination. Part 2: Optical methods, IDT [Электронный ресурс]. – URL: <http://files.stroyinf.ru/Data/637/63756.pdf> (дата обращения: 10.06.2018).

36. Середин В.В., Паршина Т.Ю. Изменение масс связанной воды в глинах при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 23–32. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.3

37. Айзенштадт А.М., Данилов В.Е. Комплексный подход к оценке наноразмерных фракций полидисперсных систем измельченных горных пород // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал.* – 2016. – Т. 8, вып. 3. – С. 97–110. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-3-97-110

38. Schoonheydt R.A., Johnston C.T. Surface and interface chemistry of clay minerals // *Developments in clay science.* – 2006. – Т. 1. – P. 87–113. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01003-2

39. Sanderson R.T. Chemical bonds and bond energy. – 2nd ed. – New York: Academic Press, 1976. – 232 p.

40. Mortier W.J. Electronegativity equalization and its application // *Structure and bonding.* – 1987. – 66. – P. 125–143. DOI: 10.1007/BFb0029839



41. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200116022> (дата обращения: 10.06.2018).

### References

1. Seredin V.V., Krasilnikov P.A., Medvedeva N.A. *Izmenenie elektrokineticheskogo potentsiala glinistykh kolloidov v vodnoy i uglevodorodnoy sredakh* [Variation of electrokinetic potential of clayey colloids in aquatic and hydrocarbon media]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2017, no.1, pp.66-74.
2. Buckley J.S., Takamura K., Morrow N.R. Influence of electrical surface charges on the wetting properties of crude oils. *SPE Reservoir Engineering*, 1989, vol.4, iss.03, pp.332-340. DOI: 10.2118/16964-PA
3. Yukselen Y., Kaya A. Zeta potential of kaolinite in the presence of alkali, alkaline earth and hydrolyzable metal ions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, vol.145, no.1-4, pp.155-168. DOI: 10.1023/A:1023684213383
4. Seredin V.V., Parshina T.U., Isaeva G.A. To the problem of the clay particles energy potential assessment. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2017, vol.16, no.4, pp.370-381. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.370
5. Zlochevskaia R.I., Korolev V.A. *Elektropoverkhnostnye yavleniya v glinistykh porodakh* [Electro-surface phenomena in clay rocks]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1988, 177 p.
6. Korolev V.A., Nesterov D.S. *Fiziko-khimicheskie zakonomernosti izmeneniya elektricheskikh zaryadov chastits glinistykh gruntov* [Physico-chemical regularities of changes of the clay soil particles electrical charge]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no.4, pp.50-60. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-50-60
7. Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. *Adsorbtsiya na glinistykh mineralakh* [Adsorption on clay minerals]. Kiev, Naukova dumka, 1975, 352 p.
8. Van Olphen H., Fripiat J.J. *Data handbook for clay minerals and other non-metallic minerals*. Oxford: Pergamon Press, 1979, 346 p.
9. Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. *Sorbtsionnye svoystva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyy obmen* [Sorptions properties of soils. Adsorption. Cation exchange]. Tula, Grif i K, 2009, 172 p.
10. Moris P. *Poverkhnost i mezhfaznye granitsy v okruzhayushchey srede. ot nanourovnya k globalnomu masshtabu* [Environmental surfaces and interfaces from the nanoscale to the global scale]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy, 2013, 543 p.
11. Kumar N., Cunlu Zhao, Aram Klaassen, Dirkvan den Ende, Frieder Mugele, Igor Siretanu. Characterization of the surface charge distribution on kaolinite particles using high resolution atomic force microscopy. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2016, vol.175, pp.100-112. DOI: 10.1016/j.gca.2015.12.003
12. Schoonheydt R.A., Johnston C.T. *Surface and interface chemistry of clay minerals. Developments in clay science*, 2006, vol.1, pp.87-113. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01003-2
13. Gupta V., Miller J. D. Surface force measurements at the basal planes of ordered kaolinite particles. *J. Colloid Interface Sci.*, 2010, vol. 344, iss. 2, pp.362-371. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.01.012
14. Voyutskiy S.S. *Kurs kolloidnoy khimii* [Course of colloid chemistry]. Moscow, Khimiya, 1976, 512 p.
15. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumyantseva N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [The microstructure of clay rocks]. Ed. E.M. Sergeev. Moscow, Nedra, 1989, 211p.
16. Sokolov V.N. *Glinistye porody i ikh svoystva* [Clay rocks and their properties]. *Nauki o zemle*, 2000, vol.6, iss. 9, pp.59-65.
17. Stromberg A.G., Semchenko D.P. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 527p.
18. Seredin V.V., Andrianov A.V. *K voprosu o metodike opredeleniya prochnostnykh kharakteristik gruntov* [On the

question about the method of getting strength characteristics of subsoils]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no.6, pp.946.

19. Goldovskaya-Peristaya L.F. et al. Izoterma sorbtzii ionov strontsiya montmorillonit-gidroslyudistymi glinami [Isotherm of sorption of strontium ions by montmorillonite-hydromicas clays]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2011, vol.11, no.2, pp.165-171.

20. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. Sorbtsionnye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelymi metallami i radioaktivnymi elementami. Med [Sorption processes in the contamination of groundwater with heavy metals and radioactive elements. Copper]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury*, 2013, no.100, pp.3-93.

21. Mikhaylov N.N., Sechina L.S., Motorova K.A. Rol glinistykh mineralov v obrazovanii adsorbtsionno-svyazannoy nefti v porodakh-kollektorakh uglevodorodnogo syrya [Role of clay minerals in formation of the adsorption-connected oil in rock-collectors of hydrocarbonic raw materials]. *Georesursy, geoenergetika, geopolitika*, 2012, no.1(5), pp.51.

22. Ivanova E.S. Vozmozhnosti prognozirovaniya sorbtsionnoy aktivnosti prirodnoy gliny [Prognosis possibilities of natural clay sorption activity]. *Izvestiya RGPU im. A.I. Gertsena. Khimiya*, 2013, no.157, pp.90-95.

23. Krasilnikov P.A., Seredin V.V., Leonovich M.F. Issledovanie raspredeleniya uglevodorodov po razrezu gruntovogo massiva [Investigation of the distribution of hydrocarbons to cut the soil mass]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no.2-14, pp.3100-3104.

24. Osipov V.I. Nanoplenki adsorbirovannoy vody v glinakh, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva [Nanofilms of adsorbed water in clay: mechanism of formation and properties]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2011, no.4, pp.291-305.

25. Korolev V.A. Teoriya elektro-poverkhnostnykh yavleniy v gruntakh i ikh primenenie [Theory of electro-surface phenomena in soils and their application]. Moscow, Sam poligrafist, 2015, 468 p.

26. Nesterov D.S., Korolev V.A. O vliyaniy pH sredy na elektricheskiy zariad chastits glinistykh gruntov [On the effect of the pH of the medium on the electrical charge of clay soil particles]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire. Sbornik nauchnykh trudov. Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Perm, Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyi issledovatel'skii universitet, 2016, vol.1, pp.451-454.

27. Lin-Guan-tsan, Fridrikhsberg D.A. Issledovanie elektrokineticheskogo potentsiala v zavisimosti ot temperatury i drugikh faktorov [The study of electrokinetic potential depending on temperature and other factors]. *Vestnik Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1963, no.16, iss.3, p.88.

28. Avakumov E.G., Boldyrev V.V. Fundamentalnye osnovy mekhanicheskoy aktivatsii, mekhanosinteza i mekhanokhimicheskikh tekhnologiy [Fundamental principles of mechanical activation, mechanosynthesis and mechanochemical technologies]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2009, 343 p.

29. Iurev P.O., Kostin I.V., Rasskazova E.V., Tserna V.V. Issledovanie izmeneniia eletrostaticheskikh kharakteristik glin Taganskogo mestorozhdeniia ot stepeni mekhanooaktivatsii [Investigation of changes in the electrostatic characteristics of clays of the Tagansky deposit on the degree of mechanical activation]. *Molodezh i nauka. Sbornik materialov X iubileinoi vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 80-letiyu obrazovaniya Krasnoyarskogo kraya*. Krasnoyarsk, Sibirskiy federalnyy universitet, 2014, available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html> (accessed 6 June 2018).

30. Suttiponpannit K., Jiang J., Sahu M., Suvachittanont S., Charinpanitkul T., Biswas P. Role of surface area, primary particle size, and crystal phase on titanium dioxide nanoparticle dispersion properties *Nanoscale Res Lett*, 2011, vol.6, no.1, p.27. DOI: 10.1007/s11671-010-9772-1
31. Frank-Kamenetskii V.A., Kotov N.V., Goilo E.A. Transformatsionnye preobrazovaniia sloistykh silikatov pri povyshennykh p-T parametrah [Transformations of layered silicates at high p-T parameters]. Leningrad, Nedra, 1983, 151 p.
32. Goylo E.A. Kristallokhimiya transformatsiy sloistykh silikatov [Crystal chemistry of transformation of layered silicates]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Saint Petersburg, 1997, 70 p.
33. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Galkin V.I., Parshina T.Iu., Isaeva G.A. Vliianie davleniia i granulometricheskogo sostava na energeticheskuiu aktivnost glin [Influence of pressure and particle size distribution on the energy activity of clays]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no.4, pp.62-71. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-62-71
34. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Medvedeva N.A., Parshina T.Iu. vliianie davleniia na ploshchad aktivnoi poverkhnosti glinistykh gruntov [Influence of pressure on the active surface area of clay soil particles]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no.3, pp.18-27. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-3-18-27
35. ISO 13099-2:2012. Colloidal systems – Methods for zeta-potential determination. Part 2: Optical methods, IDT, available at: <http://files.stroyinf.ru/Data/637/63756.pdf> (accessed 6 June 2018).
36. Seredin V.V., Parshina T.Iu. Mass change of bound water in clays under compression. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.1, pp.23-32. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.3
37. Aizenshtadt A.M., Danilov V.E. Kompleksnyi podkhod k otsenke nanorazmernykh fraktsii polidispersnykh sistem izmelchennykh gornykh porod [Comprehensive approach to the assessment of nanosized fractions of polydisperse systems of crushed rocks]. *Nanotekhnologii v stroitelstve*, 2016, vol.8, iss.3, pp.97-110. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-3-97-110
38. Schoonheydt R.A., Johnston C.T. Surface and interface chemistry of clay minerals. *Developments in clay science*, 2006, vol.1, pp.87-113. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01003-2
39. Sanderson R.T. Chemical bonds and bond energy. 2nd ed. New York, Academic Press, 1976, 232 p.
40. Mortier W.J. Electronegativity equalization and its application. Structure and Bonding, 1987, 66, pp.125-143. DOI: 10.1007/BFb0029839
41. GOST 12536-2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution], available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200116022> (accessed 6 June 2018).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

Medvedeva N.A., Alvanyan K.A., Malgina Yu.O., Seredin V.V. Zeta potential changing in compressed clays. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.1, pp.4-14. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.1