

Научная статья

УДК 631.412

doi: 10.17223/24135542/30/3

Влияние химико-минералогического состава и глубины залегания на морфологические характеристики грунта на территории г. Перми

**Леонид Давыдович Аснин¹, Михаил Сергеевич Самойлов²,
Маргарита Владимировна Першина³, Юрий Геннадьевич Целищев⁴,
Наталья Николаевна Слюсарь⁵, Александр Сергеевич Троегубов⁶**

*1, 2, 3, 5, 6 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

4 Институт технической химии Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

1 asninld@mail.ru

2 samojlov23@yandex.ru

3 mypersh@yandex.ru

4 yu-tsl@yandex.ru

5 nnslyusar@gmail.com

6 troegubov.alexandr@mail.ru

Аннотация. Изучены изменения химико-минералогического состава и морфологических свойств грунта по профилю глубины (0,6–10,9 м) в двух скважинах на северной окраине г. Перми, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга. В качестве характеристик химического состава определяли элементный состав (С, N, S, O), содержание экстрагируемых соединений железа и алюминия, общую ионообменную емкость. Все образцы характеризовались низким содержанием органического вещества (0,0–0,4%), что типично для грунтов, отобранных ниже плодородного слоя. Наблюдавшиеся различия в минералогическом и химическом составе скважин не меняли разнородность грунта (суглинистый) и тип пористости (преимущественно щелевые поры), но обуславливали некоторые отличия в виде зависимости свойств грунта от глубины залегания. Удельную поверхность образцов грунта определяли методом Брунауэра–Эммета–Теллера. Объем пор в диапазоне от 1,7 до 300 нм оценивали методом Баррета–Джойнера–Халенды. Для определения характеристик микропор использовали модифицированный метод Дубинина–Кадлеца, для чего изотерму адсорбции азота в области заполнения микропор (до относительного давления 0,005) представляли в виде суммы изотермы Дубинина–Радушкевича и изотермы Генри. Для всех образцов удельная поверхность находится в пределах 35–45 м²/г, общий объем пор – в пределах 0,032–0,056 см³/г, объем микропор – в пределах 0,010–0,015 см³/г. Основной вклад в пористость образцов вносят крупные микропоры (1,4–2 нм) и мелкие мезопоры (2–10 нм). Показано, что удельная поверхность и объем пор положительно коррелируют с содержанием глинистых минералов и отрицательно коррелируют с концентрацией аморфных гидро(оксидов) железа и алюминия. Общее содержание экстрагируемого железа не оказывает влияния на морфологические характеристики грунтов.

Ключевые слова: почва, грунт, удельная поверхность, пористость, железо, алюминий, ионообменная емкость

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSNM-2020-0024. Авторы выражают благодарность Е.М. Томилиной (ПГНИУ, г. Пермь) за выполнение рентгенофазовых измерений.

Для цитирования: Аснин Л.Д., Самойлов М.С., Першина М.В., Целищев Ю.Г., Слюсарь Н.Н., Троегубов А.С. Влияние химико-минералогического состава и глубины залегания на морфологические характеристики грунта на территории г. Перми // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2023. № 30. С. 23–39. doi: 10.17223/24135542/30/3

Original article

doi: 10.17223/24135542/30/3

Chemical-Mineralogical Composition and Occurrence Depth Impact on Morphological Characteristics of Perm City Soils

Leonid D. Asnin¹, Mikhail S. Samoilov², Margarita V. Pershina³, Yuri G. Zelishev⁴, Natalia N. Slusar⁵, Aleksandr S. Troegubov⁶

^{1, 2, 3, 5, 6} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

⁴ Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of the RAS, Perm, Russian Federation

¹ asninld@mail.ru

² samojlov23@yandex.ru

³ mypersh@yandex.ru

⁴ yu-tsl@yandex.ru

⁵ nnslyusar@gmail.com

⁶ troegubov.alexandr@mail.ru

Abstract. The chemical and mineralogical composition and morphological properties of the soil according to the depth profile (0.6–10.9 m) were studied in two wells located at a distance of 1 km from each other to the north of the city of Perm. The elemental composition (C, N, S, O), the content of extractable iron and aluminum compounds and the total ion-exchange capacity were determined as characteristics of the chemical composition. All samples are of a low content of organic matter (0.0–0.4%), which is typical for soils taken below the fertile layer. Differences between the wells do not change the type of soil (loamy) and the type of porosity (mainly slit pores) but cause some differences in the dependence of soil properties on the depth of occurrence. The specific surface area of soil samples was determined by the Brunauer-Emmett-Teller method. The pore volume in the range from 1.7 to 300 nm was evaluated by the method of Barrett-Joyner-Halenda. To determine the characteristics of micropores, a modified Dubinin-Kadlec method was used, for which the nitrogen adsorption isotherm in the area of micropore filling (up to a relative pressure of 0.005) was represented as the sum of the Dubinin-Radushkevich and the Henry isotherms. For all samples, the specific surface area is within the range of 35–45 m²/g, the total pore volume is within the range of 0.032–0.056 cm³/g and the volume of micropores is within the range of 0.010–0.015 cm³/g. The main contribution to the porosity of the samples is made by large micropores (1.4–2 nm) and small mesopores (2–10 nm). The specific surface area and pore volume positively correlate with the content of clay minerals and negatively correlate with the concentration of amorphous hydro(oxides) of iron and aluminum. The total content of extracted iron does not affect the morphological characteristics of soils.

Keywords: soil, specific surface area, porosity, iron, aluminum, ion exchange capacity

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project № FSNM-2020-0024. The authors are grateful to E.M. Tomilina (PSU, Perm) for X-ray phase measurements.

For citation: Asnin, L.D., Samoilov, M.S., Pershina, M.V., Zelishev, Yu.G., Slusar N.N., Troegubov, A.S. Chemical-Mineralogical Composition and Occurrence Depth Impact on Morphological Characteristics of Perm City Soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2023, 30, 23–39. doi: 10.17223/24135542/30/3

Введение

Грунт является сложной системой как с точки зрения своей структуры, так и с точки зрения физико-химических взаимодействий его составных частей [1, 2], которые еще мало изучены [3, 4], что, в свою очередь, ограничивает понимание механизмов формирования фильтрующих и механических свойств грунта и процессов, происходящих в педосфере при ее загрязнении. В этой связи существует потребность в определении влияния физических и химических факторов на структуру грунта. Последнюю можно представить как совокупность агрегатов и пор [3, 5]. Существуют данные, говорящие о наличии связи между химическим составом и структурой грунта, – как верхнего, плодородного слоя (почвы), так и подпочвенных горизонтов [2, 3]. Среди влияющих факторов выделяют минералогический состав, содержание органических веществ, (гидро)оксидов железа и алюминия, pH и концентрацию многовалентных катионов [2, 3, 6]. Неорганическая фракция грунта, взаимодействуя с органическим веществом, образует органо-минеральные комплексы, важную роль в формировании которых играют (гидро)оксиды железа и экстрагируемые многовалентные катионы (Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+}) [7–9]. Располагаясь на поверхности почвенных частиц, они адсорбируют органические соединения, которые способствуют дальнейшей агрегации частиц за счет межмолекулярных взаимодействий между ними [3]. Однако за пределами плодородного слоя органическое вещество в значимых количествах отсутствует, и формирование агрегатов осуществляется только за счет взаимодействия друг с другом поверхностных неорганических структур.

Поскольку интерес исследователей в основном привлекал плодородный слой почвы, намного меньше внимания уделялось структуре грунта минеральных горизонтов. Можно отметить только небольшое число работ, в которых глубина отбора проб достигала или превышала уровень материнской породы (почвенный горизонт С, 0,8–1,9 м) [10–12]. В то же время подпочвенные горизонты также играют значимую роль в фильтрации влаги и миграции загрязняющих веществ. В этой связи представляло интерес рассмотреть влияние химико-минералогического состава на морфологические

характеристики (удельную поверхность и пористость) грунта и их изменение по профилю глубины, что особенно важно при изучении процессов вертикальной миграции веществ. Территория г. Перми практически не исследована в этом отношении. В работах [11, 13] представлены данные о химическом составе верхнего слоя (до 1,6 м) почвы в различных районах города и пригородных территориях, однако большие глубины не изучались. Сведения о строении поверхности и пористой структуре пермских грунтов в доступной литературе отсутствуют.

Объекты и методы

Образцы грунта получены из двух скважин на северной окраине г. Перми, находящихся на расстоянии 1 км друг от друга и удаленных от жилой застройки и промышленных предприятий не менее чем на 300 м. Образцы получали в виде кернов высотой 0,2 м с глубин: скважина 1 – 0,6; 3,1; 5,1; 8,1 и 10,9 м; скважина 2 – 1,1; 5,4; 5,6 и 10,6 м, – доводили до воздушно-сухого состояния в течение нескольких дней при температуре 30°C, измельчали и просеивали через набор сит с размером отверстий 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0 мм. По результатам гранулометрического анализа рассчитывали показатель прочности агрегатов (ППА) [3] как отношение массы частиц с диаметром больше 1 мм к общей массе образца.

В предварительных экспериментах было установлено, что размер фракции не влияет существенно на результаты, поэтому в дальнейшем для испытаний использовали фракцию 0,1–0,25 мм.

Элементный анализ (C, H, N, S) выполняли на элементном анализаторе Vario EL Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия). Содержание органического углерода определяли в образцах после их обработки 5%-ной соляной кислотой.

Определение железа и алюминия. Экстракцию аморфных железа и алюминия осуществляли оксалатным буфером по Тамму при 80°C и перемешивании в течение 15 мин [14], общего железа – дитионит-цитрат-бикарбонатным буфером при комнатной температуре и перемешивании в течение 2 ч [14]. В обоих случаях для анализа брали 5 г почвы, каждое определение повторяли 3 раза. Вытяжки Тамма упаривали, прокаливали для разрушения мешающих анализу оксалатов и восстанавливали добавлением воды. Содержание металлов находили фотометрически: железа – сульфосалицилатным методом в щелочной среде [15], алюминия – с эриохромцианином Р [16].

Ионообменную емкость почвы находили методом Бобко–Аскинази в модификации Грабова и Уваровой [17], вытесняя обменные катионы раствором соли бария, с последующим его гравиметрическим определением в виде сульфата.

pH грунта измеряли в водной суспензии (400 г/л) на иономере И-160МП (Гомельский завод измерительных приборов, Беларусь).

Определение минералогического состава выполняли методом рентгенофазового анализа на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser

(Bruker, ФРГ) в лаборатории наноминералогии Пермского государственного национального исследовательского университета в соответствии со стандартными методиками [18, 19].

Определение морфологических характеристик. Плотность частиц грунта (истинную плотность) измеряли на гелиевом пикнометре Ultraruspometer 1200e (Quantachrom Instruments, США) после сушки образцов при 90°C в течение 5 ч. Определение удельной поверхности ($S_{уд}$) и пористости почв выполняли методом низкотемпературной (-196°C) адсорбции азота на установке ASAP 2020MP (Micromeritics, США). Образцы предварительно дегазировали под вакуумом при температуре 90°C в течение 3,5 ч. Для определения удельной поверхности и общего объема пор ($V_{общ}$) измерения проводили в диапазоне относительного давления азота (p/p_0 ; p – равновесное давление, p_0 – давление насыщенных паров) от 0 до 1 с шагом $\sim 0,05$. Для определения объема микропор ($V_{ми}$) измерения проводили до $p/p_0 \approx 0,005$ с шагом 0,0001–0,0005. Величину удельной поверхности рассчитывали по уравнению Брунауэра–Эммета–Теллера по алгоритму, предложенному Рукеролем [20]. Общий объем пор, или, более точно, объем пор в широком диапазоне размеров от 1,7 до 300 нм, и распределение пор по размерам оценивали методом Баррета–Джойнера–Халенды (БДХ) с помощью программного комплекса ASAP 2020 Plus. Для определения характеристик микропор использовали модифицированный метод Дубинина–Кадлеца [21], который позволяет учесть вклад в поглощение азота при низких относительных давлениях адсорбции на плоской поверхности и в макропорах. Согласно этому методу общий адсорбированный объем азота (V) есть сумма объемов, адсорбированных в микропорах и в более крупных порах. Первая часть подчиняется теории объемного заполнения микропор и описывается уравнением Дубинина–Радушкевича (ДР), тогда как адсорбция в крупных порах описывается уравнением поверхностной адсорбции. Учитывая, что эксперименты проводятся при очень низких давлениях, в качестве такового использована линейная изотерма адсорбции. Итоговое уравнение выглядит следующим образом:

$$V = K \left(p/p_0 \right) + V_{ми} \exp \left[- \left(\frac{RT \ln (p_0/p)}{E} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, E – характеристическая энергия адсорбции, K – постоянная. Аппроксимируя экспериментальные данные уравнением (1), получали значения параметров K , $V_{ми}$ и E . Коэффициент детерминации во всех случаях превышал 0,99.

Результаты и обсуждение

Химико-минералогический состав и ионообменная емкость грунта

Образцы грунта отбирались с глубины больше 0,5 м, что ниже плодородного слоя, поэтому они не содержали заметных количеств органического вещества. Это подтверждается результатами элементного анализа до и после

обработки образцов соляной кислотой. Если до обработки содержание С колебалось в диапазоне 0,0–0,4%, то после удаления карбонатов оно снизилось до нуля для всех глубин. Азот – другой признак наличия белков и гуминовых кислот – отсутствовал во всех образцах.

Минералогический состав (табл. 1) на обеих площадках подобен на качественном уровне и в основном представлен кварцем, глинистыми минералами, плагиоклазами и полевым шпатом. Распределение минералов по профилю глубины в скв. 1 равномерное в пределах погрешности определения, тогда как в скв. 2 заметно уменьшение содержания кварца за счет увеличения доли глинистой фракции на глубине 10,6 м по сравнению с подпочвенным слоем (1,1 м). Глинистая фракция представлена иллитом, хлоритом, смектитам и каолинитом (табл. 2). Ввиду сложностей рентгенофазового анализа глинистых минералов относительная погрешность их определения может достигать 30% [14]. По этой причине данные табл. 2 следует воспринимать как полуколичественные оценки. Тем не менее большое различие в содержании смектитов и несколько меньшее в содержании иллита между скв. 1 и 2 не может быть объяснено ограничениями метода и случайными погрешностями и отражает отличие в составе образцов. Это отличие, как будет показано далее, обуславливает некоторое различие в морфологических свойствах грунтов, однако оно недостаточно сильное, чтобы повлиять на такую интегральную характеристику фазового состава, как истинная плотность (ρ_n). Как видно из табл. 3, значение ρ_n колеблется в пределах $\pm 0,5\%$ по глубине и в этих пределах совпадает для обеих скважин.

Таблица 1

Минеральный состав (%) образцов грунта

Минералы	Скважина 1					Скважина 2				
	Глубина, м					Глубина, м				
	0,6	3,1	5,1	8,1	10,9	1,1	5,4	5,6	10,6	
Кварц	43,2	41,6	44,6	43,9	44,8	41,4	30,6	37,0	32,9	
Калиевый полевой шпат	9,6	10,4	12,2	10,3	10,4	9,0	11,3	10,0	9,9	
Плагиоклазы	19,2	18,2	15,4	13,2	15,8	20,5	14,3	15,7	13,1	
Кальцит	0,0	2,9	2,6	2,8	1,1	1,1	5,5	1,3	1,5	
Доломит	0,4	0,0	0,2	0,9	0,6	0,8	1,7	0,7	0,9	
Глинистые минералы	27,6	27,1	25,0	29,1	27,4	27,2	36,6	35,3	41,7	

Таблица 2

Минеральный состав (%) глинистой фракции

Минералы	Скважина 1					Скважина 2				
	Глубина, м					Глубина, м				
	0,6	3,1	5,1	8,1	10,9	1,1	5,4	5,6	10,6	
Иллит	45,3	47,0	53,5	45,4	44,5	38,0	19,2	21,7	25,7	
Каолинит	9,6	6,4	10,5	7,8	7,0	6,7	4,2	1,2	2,0	
Хлорит	38,1	38,5	23,3	41,2	42,5	26,4	32,7	30,6	29,3	
Смектиты	7,0	8,2	12,7	5,6	6,0	28,9	43,9	46,5	43,0	

Морфологические характеристики грунтов

Глубина, м	$S_{уд}$, М ² /Г	$V_{общ}$, см ³ /Г	$V_{ми}$, см ³ /Г	$\rho_{и}$, *** г/см ³	ППА	E , Дж/ моль
Скважина 1						
0,6	34,9 ± 0,1	0,037	0,0097 ± 0,0001	2,646	0,46	6134 ± 46
3,1	35,7 ± 0,2	0,035	0,0110 ± 0,0001	2,657	0,41	6249 ± 42
5,1	37,8 ± 0,1	0,037	0,0117 ± 0,0002	2,671	0,40	6208 ± 72
8,1	40,7 ± 0,1	0,041	0,0124 ± 0,0002	2,657	0,44	6205 ± 60
10,9	36,2 ± 0,1	0,037	0,0110 ± 0,0002	2,669	0,46	6228 ± 57
10,9*	29,3 ± 0,1	0,033	0,0087 ± 0,0001	–	–	6220 ± 62
10,9**	8,5 ± 0,1	0,008	0,0024 ± 0,0000	–	–	6256 ± 61
Скважина 2						
1,1	36,6 ± 0,0	0,032	0,0114 ± 0,0002	2,655	0,49	6347 ± 81
5,4	45,1 ± 0,2	0,048	0,0145 ± 0,0003	2,655	0,57	6284 ± 64
5,6	42,6 ± 0,1	0,049	0,0135 ± 0,0002	2,658	0,59	6161 ± 64
10,6	44,3 ± 0,1	0,056	0,0138 ± 0,0002	2,659	0,60	6241 ± 56

Примечания. * – фракция грунта < 0,05 мм после мокрого рассева; ** – фракция грунта > 0,05 мм после мокрого рассева; *** – погрешность определения не превышала 0,05%.

Профили концентраций общего железа ($Fe_{общ}$), аморфных железа ($Fe_{ам}$) и алюминия ($Al_{ам}$) и ионообменной емкости (КОЕ) представлены на рис. 1–4. Под аморфными понимают металлы в составе аморфных оксидов и обмениваемые ионы металлов глинистых минералов, тогда как $Fe_{общ}$ кроме аморфного включает железо кристаллических оксидов (гематита, гетита и др.) [14]. Al^{3+} в дитионит-цитратных вытяжках не измеряли, поскольку в этих условиях выщелачивается алюминий алюмосиликатной матрицы, что делает результаты анализа неопределенными [22].

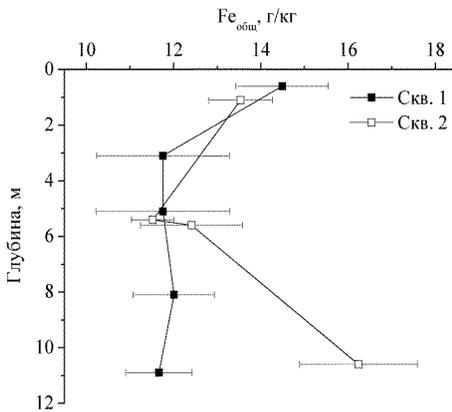


Рис. 1. Зависимости концентрации общего экстрагируемого железа ($Fe_{общ}$) в грунте от глубины в скважинах 1 и 2

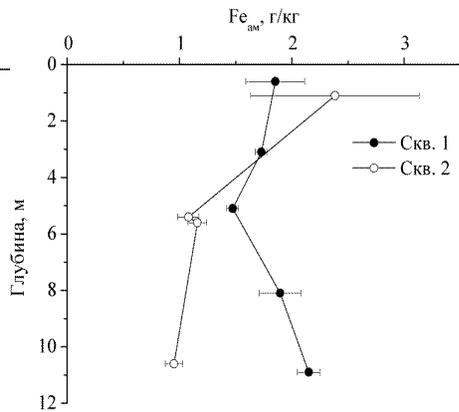


Рис. 2. Зависимости концентрации аморфного железа ($Fe_{ам}$) в грунте от глубины в скважинах 1 и 2

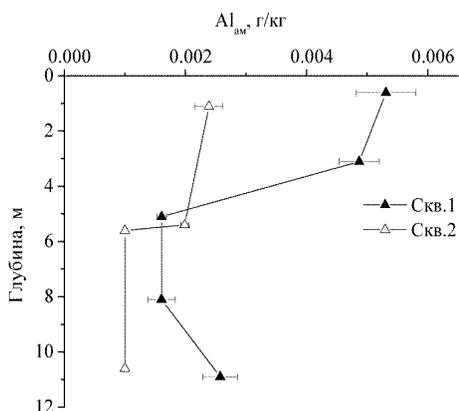


Рис. 3. Зависимости концентрации аморфного алюминия ($Al_{ам}$) в грунте от глубины в скважинах 1 и 2

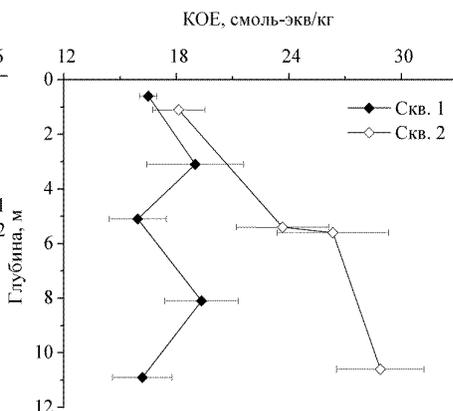


Рис. 4. Зависимости ионообменной емкости (КОЕ) грунта от глубины в скважинах 1 и 2

Изменения концентрации алюминия и железа находятся в пределах типичных для почвенных образцов [3, 12, 13], в том числе для образцов, отобранных из подпочвенного горизонта С (1,1–1,5 м) на территории г. Перми [11], в ~ 10 км южнее описанных в данной работе скважин. Содержание $Fe_{общ}$ и $Fe_{ам}$ на обеих площадках примерно совпадает до глубины 5,6 м, но значительно различается на максимальной исследованной глубине 10,6–10,9 м, где для $Fe_{общ}$ наблюдается превышение концентрации в скв. 2 по сравнению со скв. 1, а для $Fe_{ам}$ наблюдается обратная зависимость. Содержание алюминия в скв. 1 превышает таковое в скв. 2 в подпочвенном слое и на большой глубине, и если концентрация $Al_{ам}$ в последнем случае незначительно изменяется (уменьшается) по глубине, то для скв. 1 наблюдается квазипараболический профиль его концентрации.

КОЕ в скв. 1 флуктуирует по глубине в пределах погрешности эксперимента между 16 и 19 смоль(экв)/кг, тогда как в скв. 2 увеличивается от 18 до 28 смоль(экв)/кг. Представленные результаты находятся в хорошем согласии с известным фактом, что в минеральных горизонтах КОЕ в основном связана с глинистым материалом [23]. Действительно, более высокая КОЕ для скв. 2 соответствует более высокому содержанию глинистых минералов, а ее увеличение с глубиной в данной скважине коррелирует с увеличением в ней доли глинистой составляющей (см. табл. 1). Реакция среды грунта на обеих площадках близка к нейтральной: рН грунта в подпочвенном слое (0,6–1,1 м) составляет 6,9 (скв. 1) или 6,2 (скв. 2) и увеличивается до 8,1–8,3 (скв. 1) или 7,8–8,0 (скв. 2) на больших глубинах. Корреляции величины рН с КОЕ или другими химическими характеристиками грунта не наблюдается.

Морфологические свойства грунта

Значения морфологических характеристик грунта на обеих площадках отличаются незначительно, однако различаются тренды изменения характе-

ристик с глубиной. В скв. 1 $S_{уд}$ медленно возрастает к глубине 8,1 м, после чего опускается до начального значения (см. табл. 3). Общая пористость по БДХ и микропористость изменяются коррелятивно с удельной поверхностью. В скв. 2 $S_{уд}$ и $V_{ми}$ увеличиваются до уровня 5,4 м, после чего не изменяются; $V_{ми}$ растет монотонно во всем диапазоне исследованных глубин. В результате наблюдается заметное, хотя и небольшое, превышение морфологических характеристик на глубине ~ 11 м в скв. 2 по сравнению со скв. 1. Для микропористости небольшое превышение наблюдается во всем исследованном диапазоне.

Обычно микро- и мезопористость относят к глинистой фракции почв и грунтов. Первичные частицы кристаллических минералов могут формировать поры в местах соприкосновения частиц или в составе агрегатов, но это будут относительно крупные мезопоры и макропоры. Для проверки этого предположения воздушно сухие образцы грунта (0,1–0,25 мм) были отмыты на сите с диаметром отверстий 0,05 мм водой; задержавшиеся на сите частицы обработаны 0,3 М щавелевой кислотой и вновь отмыты на сите водой. У двух полученных фракций – больше 0,05 мм, обогащенной песком, и меньше 0,05 мм, обогащенной глиной, – измерены величины $S_{уд}$, $V_{общ}$ и $V_{ми}$. В табл. 3 приведены результаты измерений для образца скв. 1 с глубины 10,9 м. Как видно, в песчаной фракции почти отсутствуют микропоры, а ее удельная поверхность составляет 24% от таковой исходного образца. В то же время объем микропор и удельная поверхность глинистой фракции составляют примерно 80% от данных величин исходного образца. Аналогичные результаты были получены для других образцов, но они не приведены в целях экономии места. По-видимому, более высокое содержание глины в образцах скв. 2 на глубине более 5 м и объясняет небольшое превышение характеристик пористости по сравнению с образцами скв. 1. Также отметим, что с указанным фактом, как и с ростом доли глинистой фракции с увеличением глубины в скв. 2, согласуется более высокая прочность частиц грунта, косвенно оцениваемая по величине ППА, в данной скважине по сравнению со скв. 1 на всех глубинах, кроме подпочвенного слоя, причем для скв. 2 величина ППА монотонно увеличивается от 0,49 до 0,60 по мере удаления от поверхности. Это, по-видимому, объясняется цементирующим действием глинистых минералов [24], в особенности смектита [25], содержание которого в скв. 2 выше, чем в скв. 1.

Структура пористого пространства во всех образцах на обеих площадках одинакова. Об этом свидетельствует тот факт, что петли гистерезиса на изотермах низкотемпературной адсорбции азота для всех образцов относятся к одному типу, НЗ по классификации ИЮПАК [26], а кривые распределения пор по размерам имеют одну форму. Пример соответствующих графиков для одного образца приведен на рис. 5. Такие зависимости характерны для глинистых минералов с преобладающей пористостью щелевого типа, образованной пластинчатыми частицами [26, 27]. Анализ кривых распределения пор по размерам показывает, что макропоры (> 50 нм) составляют небольшую долю общего пористого пространства, 10–20%, тогда как около половины

величины $V_{\text{общ}}$ связано с порами шириной менее 10 нм. Доля узких пор, ассоциированных с величиной $V_{\text{мн}}$, составляет 23–30% общего объема пор. Относительно их размера можно предположить на основании низкой величины E и отсутствия признаков изотермы I типа [26] на начальном участке изотермы адсорбции, что он находится в диапазоне, характерном для супермикропор по Дубинину [28], т.е. 1,4–3,2 нм.

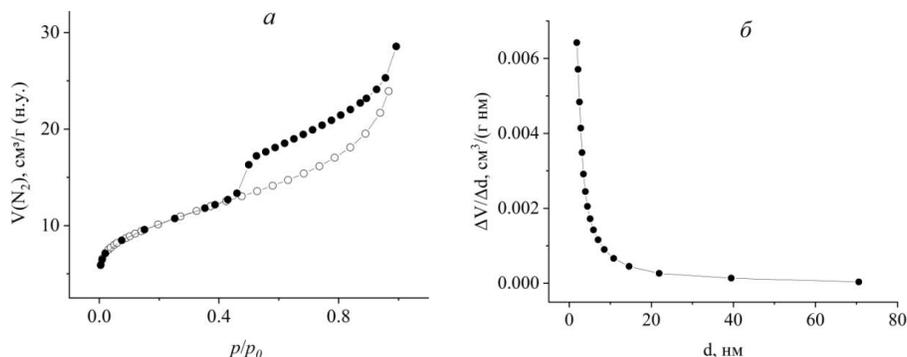


Рис. 5. Изотермы низкотемпературной адсорбции (светлые точки) и десорбции (темные точки) азота (а) и кривая распределения пор по размерам (б); d – диаметр пор, V – объем пор. Образец: скважина 1, глубина 10,9 м

Сравнение с литературными данными показывает, что найденные значения $S_{\text{уд}}$ по порядку величины соответствуют значениям, публикуемым для смешанных глинистых пород (20–80 м²/г) [10, 29–32]. Общий объем пор таких материалов часто выше 0,2 см³/г [33, 34], что объясняется низким содержанием или отсутствием в них непористой песчаной фракции. Однако в литературе для образцов с высоким содержанием кварцевого песка встречаются и значения, близкие приведенным в табл. 3 [31, 35].

Корреляции между химическим составом и морфологическими свойствами

Хорошо прослеживаемая на качественном уровне связь между содержанием глинистых минералов и структурными характеристиками породы обсуждалась в предыдущем разделе. Поиск корреляций между содержанием обменяемых ионов, разных форм железа и алюминия и характеристиками поверхности основан на предположении, что многовалентные ионы могут служить мостиками, связывающими различные первичные частицы в микроагрегаты или микроагрегаты между собой [2, 36], тем самым способствуя формированию пористой структуры. Кроме того, микрокристаллиты оксидов железа и алюминия сами могут служить первичными частицами, формирующими пористые агрегаты. Полученные данные (табл. 4) не обнаруживают коррелятивной связи между содержанием общего экстрактивного железа и структурой грунта. В то же время высокая положительная корреляция наблюдается между КОЕ и всеми морфологическими характеристиками

($S_{уд}$, $V_{общ}$, $V_{ми}$), она объясняется связью между КОЕ и содержанием глины, с одной стороны, и содержанием глины и морфологическими характеристиками – с другой. Увеличение $Fe_{ам}$ и $Al_{ам}$, наоборот, ведет к уменьшению объема пор и, соответственно, удельной поверхности. Алюминий оказывает более сильное влияние на объем микропор, чем на общую пористость. В качестве примера на рис. 6 показана зависимость $S_{уд}$ от содержания аморфных Fe и Al. Как видно, данные с двух участков хорошо встраиваются в единую корреляционную полосу. Это свидетельствует о том, что, несмотря на некоторые различия в свойствах грунтов с площадок 1 и 2, они принадлежат одному типу.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между характеристиками химического состава и морфологическими свойствами грунтов по объединенным данным для скважин 1 и 2

Морфологические характеристики	Глинистые минералы	$Fe_{общ}$	$Fe_{ам}$	$Al_{ам}$	pH	КОЕ
$S_{уд}$	0,882	0,134	-0,801	-0,731	0,310	0,861
$V_{общ}$	0,956	0,439	-0,858	-0,599	0,323	0,924
$V_{ми}$	0,825	0,011	-0,765	-0,769	0,345	0,827

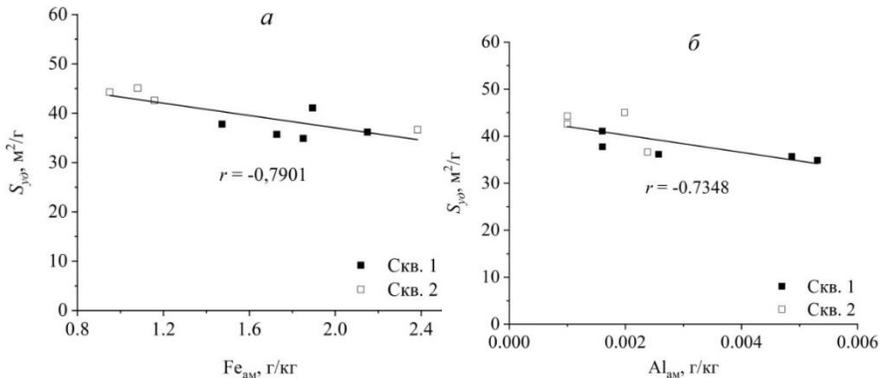


Рис. 6. Зависимости удельной поверхности от содержания аморфного Fe (а) и аморфного Al (б); r – коэффициент корреляции

Отрицательная корреляция между пористостью и содержанием оксалоторастворимых металлов указывает на наличие связи между появлением на поверхности частиц соответствующих оксидов и либо разрушением пористых агрегатов, либо формированием более крупных пор, однако природа этой связи пока остается невыясненной. Независимость морфологических характеристик от $Fe_{общ}$ можно объяснить тем, что составляющие этот параметр на 80–90% кристаллические оксиды железа не участвуют в образовании микро- и мезопористой структуры, присутствуя в образцах в виде отдельных микрочастиц или непористых элементов грунтовых агрегатов. Слабое влияние $Fe_{общ}$ на текстуру почвы отмечалось другими авторами [3, 36].

Выводы

Характеристики пористой структуры суглинистого грунта на двух исследованных площадках, расположенных на территории г. Перми, находятся в слабой зависимости от глубины горизонта и в значительной мере определяются содержанием глинистых минералов. Небольшое отрицательное влияние на удельную поверхность и пористость образцов оказывает содержание оксалаторастворимых (аморфных) форм железа и алюминия, причем Al оказывает более слабое влияние, чем Fe. Образцы характеризуются типичными для суглинистых грунтов значениями удельной поверхности (35–45 м²/г) и небольшим объемом пор (0,035–0,056 м²/г), основной вклад в который вносят крупные микропоры (1,4–2 нм) и мелкие мезопоры (2–10 нм).

Относящиеся к одному типу породы образцы с двух исследованных площадок близки по химико-минералогическому составу и морфологическим свойствам в верхнем горизонте и заметно отличаются в нижних исследованных горизонтах. Амплитуда этих вариаций составляет ~ 20% по удельной поверхности и ~ 40% по общему объему пор.

Список источников

1. Юдина А.В., Фомин Д.С., Котельникова А.Д., Милановский Е.Ю. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1340–1362.
2. Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: a review // *Geoderma*. 2005. Vol. 124. P. 3–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005
3. Regelink I.C., Stoof C.R., Rousseva S., Weng L., Lair G.J., Kram P., Nikolaidis N.P., Kercheva M., Banwart S., Comans R.N.J. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties // *Geoderma*. 2015. Vol. 247-248. P. 24–37. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2015.01.022
4. Zubkova T.A. Application of the methods of allied sciences in soil studies // *Eur. Soil Sci.* 2006. Vol. 39. P. S26–S30. doi: 10.1134/S1064229306130060
5. Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils // *Soil Res.* 1991. Vol. 29. P. 815–828. doi: 10.1071/SR9910815
6. Six J., Paustian K., Elliott E.T., Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. Vol. 64. P. 681–689. doi: 10.2136/sssaj2000.642681x
7. Curtin D., Steppuhn H., Selles F. Effect of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994. Vol. 57. P. 1277–1283. doi: 10.4172/2165-8056.1000121
8. Kaiser M., Ellerbrock R.H., Wulf M., Dultz S., Hierath C., Sommer M. The influence of mineral characteristics on organic matter content, composition, and stability of topsoils under long-term arable and forest land use // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. 1–16. doi: 10.1029/2011JG001712
9. Weng L., Vega F.A., van Riemsdijk W.H. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling // *Environ. Sci. Technol.* 2011. Vol. 45 (19). P. 8420–8428. doi: 10.1021/es201844d
10. Алексеева Т.В., Соколовска З., Хайнос М., Алексеев А.О., Калинин П.И. Водопрочность агрегатов почв субтропиков и тропиков (Грузия и Китай): связь с минералогическим составом и химическими свойствами // *Почвоведение*. 2009. № 4. С. 452–462.

11. Гилев В.Ю. Оксидогенез и редуктогенез в почвах на элювии и делювии пермских глин Предуралья : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Пермь, 2007. 22 с.
12. Wu X., Cai C., Wang J., Wei Y., Wang S. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China // *Soil Till. Res.* 2016. Vol. 157. P. 11–22. doi: 10.1016/j.still.2015.11.005
13. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Heidelberg : Springer Verlag, 2006. 993 p.
14. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. М. : Наука, 1971. 266 с.
15. Шарло Г. Методы аналитической химии: количественный анализ неорганических соединений. М. ; Л. : Химия, 1965. 975 с.
16. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М. : Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
17. МП-03/РФ-2015. Рентгенографический количественный фазовый анализ осадочных горных пород : метод. рекомендации. Пермь : Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2015.
18. МП-04/РФ-2015. Рентгенографический полуколичественный фазовый анализ глинистых горных пород : метод. рекомендации. Пермь : Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2015.
19. Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET equation applicable to microporous adsorbents? // *Stud. Surf. Sci. Catal.* 2007. Vol. 160. P. 49–56. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80008-5
20. Dubinin M.M., Kadlec O. New ways in determination of the parameters of porous structure of microporous carbonaceous adsorbents // *Carbon.* 1975. Vol. 13. P. 263–265. doi: 10.1016/0008-6223(75)90026-3
21. Rennert T. Wet-chemical extractions to characterise pedogenic Al and Fe species – a critical review // *Soil Res.* 2018. Vol. 57, is. 1. P. 1–16. doi: 10.1071/SR18299
22. Водяницкий Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 155 с.
23. Соколова Т.А., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула : Гриф и К, 2009. 172 с.
24. Munkholm L.J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management // *Geoderma.* 2011. Vol. 167-168. P. 236–246. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.005
25. Barzegar A.R., Oades J.M., Rengasamy P., Murray R.S. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay function // *Geoderma.* 1995. Vol. 65. P. 93–108. doi: 10.1016/0016-7061(94)00028-9
26. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87, is. 9–10. P. 1051–1069. doi: 10.1515/pac-2014-1117
27. Sing K.S.W., Williams R.T. Physisorption hysteresis loops and the characterization of nanoporous materials // *Ads. Sci. Technol.* 2004. Vol. 22 (10). P. 773–782. doi: 10.1260/0263617053499032
28. Dubinin M.M. Microporous structures and absorption properties of carbonaceous adsorbents // *Carbon.* 1983. Vol. 21. P. 359–366. doi: 10.1016/0008-6223(83)90128-8
29. Cuevas J., Leguey S., Garralón A., Rastroero M.R., Procopio J.R., Sevilla M.T., Jiménez N.S., Abad R.R., Garrido A. Behavior of kaolinite and illite-based clays as landfill barriers // *Appl. Clay Sci.* 2009. Vol. 42. P. 497–509. doi: 10.1016/j.clay.2008.06.017
30. Dogan M., Dogan A.U., Yesilyurt F.I., Alaygut D., Buckner I., Wurster D.E. Baseline studies of the clay minerals society special clays: specific surface area by the Brunauer Emmett Teller (BET) method // *Clays Clay Miner.* 2007. Vol. 55. P. 534–541. doi: 10.1346/CCMN.2007.0550508

31. Kuila U., Prasad M. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales // *Geophys. Prosp.* 2013. Vol. 61. P. 341–362. doi: 10.1111/1365-2478.12028
32. Osacky M., Geramian M., Ivey D.G., Liu Q., Etsell T.H. Influence of nonswelling clay minerals (Illite, Kaolinite, and Chlorite) on nonaqueous solvent extraction of bitumen // *Energy Fuels.* 2015. Vol. 29. P. 4150–4159. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b00269
33. Lu S.-G., Malik Z., Chen D.-P., Wu C.-F. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides // *Catena.* 2014. Vol. 123. P. 79–87. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.010
34. Sills I.D., Aylmore L.A.G., Quirk J.P. An analysis of pore size of illite-kaolinite mixtures // *J. Soil Sci.* 1973. Vol. 24 (4). P. 480–490. doi: 10.1180/claymin.1995.030.2.01
35. Lv T., Li X., Chen Zh., Xu Ch., Zhang Y., Cai J. Effect of fulvic acid and sodium chloride on the phase equilibrium of methane hydrate in mixed sand–clay sediment // *J. Chem. Eng. Data.* 2019. Vol. 64. P. 632–639. doi: 10.1021/acs.jced.8b00884
36. Duiker S.W., Rhoton F.E., Torrent J., Smeck N.E., Lal R. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. Vol. 67. P. 606–611. doi: 10.2136/sssaj2003.0606

References

1. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskij E.Yu. Ot ponyatiya elementarnoj pochvennoj chasticy k granulometricheskomu i mikroagregatnomu analizam (obzor) [From elemental soil particle to granulometric and microaggregate analyses (overview)] // *Soil science.* 2018. V. 11. P. 1340–1362.
2. Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: a review // *Geoderma.* 2005. V. 124. P. 3–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005
3. Regelink I.C. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties / I.C. Regelink, C.R. Stoof, S. Rousseva, L. Weng, G.J. Lair, P. Kram, N.P. Nikolaidis, M. Kercheva, S. Banwart, R.N.J. Comans // *Geoderma.* 2015. V. 247–248. P. 24–37. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2015.01.022
4. Zubkova T.A. Application of the methods of allied sciences in soil studies // *Eur. Soil Sci.* 2006. V. 39. P. S26–S30. doi:10.1134/S1064229306130060
5. Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils // *Soil Res.* 1991. V. 29. P. 815–828. doi: 10.1071/SR9910815
6. Six J., Paustian K., Elliott E.T., Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. V. 64. P. 681–689. doi: 10.2136/sssaj2000.642681x
7. Curtin D., Steppuhn H., Selles F. Effect of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994. V. 57. P. 1277–1283. doi: 10.4172/2165-8056.1000121
8. Kaiser M. The influence of mineral characteristics on organic matter content, composition, and stability of topsoils under long-term arable and forest land use / M. Kaiser, R.H. Ellerbrock, M. Wulf, S. Dultz, C. Hierath, M. Sommer // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117 P. 1–16. doi: 10.1029/2011JG001712
9. Weng L., Vega F.A., van Riemsdijk W.H. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45 No. 19. P. 8420–8428. doi: 10.1021/es201844d
10. Alekseeva T.V., Sokolovska Z., Xajnos M., Alekseev A.O., Kalinin P.I. Vodoprochnost agregatov pochv subtropikov i tropikov (Gruziya i Kitaj): svyaz s mineralogicheskim sostavom i ximicheskimi svojstvami [Water resistance of soil aggregates of subtropics and tropics (Georgia and China): relationship with mineralogical composition and chemical properties] // *Soil science.* 2009. V 4. P. 452–462.

11. Gilev V.Yu. *Oksidogenez i reduktogenez v pochvax na elyvii i delyvii permskix glin Preduralya* [Oxidogenesis and reductogenesis in soils on eluvia and deluvia of Permian clays of the Urals terms] // Avtoref. dis. kand. s.-x. nauk. Perm': Perm. gos. selskoxoz. akad., 2007. 22 p.
12. Wu X., Cai C., Wang J., Wei Y., Wang S. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China // *Soil Till. Res.* 2016. V. 157. P. 11–22. doi: 10.1016/j.still.2015.11.005
13. Vodyaniczkiy Yu.N. *Soedineniya zheleza i ix rol' v oxrane pochv* [Iron compounds and their role in soil protection]. M.: GNU Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2010. 155 p.
14. Pansu M., Gautheyrou J. *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer Verlag. Heidelberg. 2006. 993 p.
15. Tixonov V.N. *Analiticheskaya ximiya alyuminiya* [Analytical chemistry of aluminium]. Moskva: Nauka, 1971. 266 p.
16. Sharlo G. *Metody` analiticheskoy ximii: kolichestvenny`j analiz neorganicheskix soedinenij* [Analytical chemistry methods: quantitative analysis of inorganic compounds]. Moskva, Leningrad: Ximiya, 1965. 975 p.
17. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po ximicheskomu analizu pochv* [Manual for the chemical analysis of soils]. M.: izd-vo MGU, 1970. 488 p.
18. MP-03/RF-2015. *Rentgenograficheskij kolichestvenny`j fazovyj analiz osadochnyx gornyx porod: metodicheskie rekomendacii* [MP-03/RF-2015. Radiographic quantitative phase analysis of sedimentary rocks: methodological recommendations]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta, 2015.
19. MP-04/RF-2015. *Rentgenograficheskij polukolichestvenny`j fazovyj analiz glinisty`x gornyx porod: metodicheskie rekomendacii* [MP-04/RF-2015. Radiographic quantitative phase analysis of sedimentary rocks: methodological recommendations]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta, 2015.
20. Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET equation applicable to microporous adsorbents? // *Stud. Surf. Sci. Catal.* 2007. V. 160. P. 49–56. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80008-5
21. Dubinin M.M., Kadlec O. New ways in determination of the parameters of porous structure of microporous carbonaceous adsorbents // *Carbon.* 1975. V. 13. P. 263–265. doi: 10.1016/0008-6223(75)90026-3
22. Rennert T. Wet-chemical extractions to characterise pedogenic Al and Fe species – a critical review // *Soil Res.* 2018. V. 57. Is. 1. P. 1–16. doi: 10.1071/SR18299
23. Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. *Sorbcionny`e svoystva pochv. Adsorbciya. Kationny`j obmen* [Sorptions properties of soils. Adsorption. Cation exchange]. Tula: Grif i K, 2009. 172 p.
24. Munkholm L.J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management // *Geoderma.* 2011. V. 167–168. P. 236–246. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.005
25. Barzegar A.R., Oades J.M., Rengasamy P., Murray R.S. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay function // *Geoderma.* 1995. V. 65. P. 93–108. doi: 10.1016/0016-7061(94)00028-9
26. Thommes M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, J.P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, K.S.W. Sing // *Pure Appl. Chem.* 2015. V. 87. Is. 9–10. P. 1051–1069. doi: 10.1515/pac-2014-1117
27. Sing K.S.W., Williams R.T. Physisorption hysteresis loops and the characterization of nanoporous materials // *Ads. Sci. Technol.* 2004. V. 22. No.10. P. 773–782. doi: 10.1260/0263617053499032

28. Dubinin M.M. Microporous structures and absorption properties of carbonaceous adsorbents // *Carbon*. 1983. V. 21. P. 359–366. doi: 10.1016/0008-6223(83)90128-8
29. Cuevas J. Behavior of kaolinite and illite-based clays as landfill barriers / J. Cuevas, S. Leguey, A. Garralón, M.R. Rastroero, J.R. Procopio, M.T. Sevilla, N.S. Jiménez, R.R. Abad, A. Garrido // *Appl. Clay Sci.* 2009. V. 42. P. 497–509. doi: 10.1016/j.clay.2008.06.017
30. Dogan M. Baseline studies of the clay minerals society special clays: specific surface area by the Brunauer Emmett Teller (BET) method / M. Dogan, A.U. Dogan, F.I. Yesilyurt, D. Alaygut, I. Buckner, D.E. Wurster // *Clays Clay Miner.* 2007. V. 55. P. 534–541. doi: 10.1346/CCMN.2007.0550508
31. Kuila U., Prasad M. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales // *Geophys. Prosp.* 2013. V. 61. P. 341–362. doi:10.1111/1365-2478.12028
32. Osacky M., Geramian M., Ivey D.G., Liu Q., Etsell T.H. Influence of nonswelling clay minerals (Illite, Kaolinite, and Chlorite) on nonaqueous solvent extraction of bitumen // *Energy Fuels*. 2015. V. 29. P. 4150–4159. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b00269
33. Lu S.-G., Malik Z., Chen D.-P., Wu C.-F. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides // *Catena*. 2014. V. 123. P. 79–87. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.010
34. Sills I.D., Aylmore L.A.G., Quirk J.P. An analysis of pore size of illite-kaolinite mixtures // *J. Soil Sci.* 1973. V. 24. No. 4. P. 480–490. doi: 10.1180/claymin.1995.030.2.01
35. Lv T. Effect of fulvic acid and sodium chloride on the phase equilibrium of methane hydrate in mixed sand–clay sediment / T. Lv, X. Li, Zh. Chen, Ch. Xu, Y. Zhang, J. Cai // *J. Chem. Eng. Data*. 2019. V. 64 P. 632–639. doi: 10.1021/acs.jced.8b00884
36. Duiker S.W., Rhoton F.E., Torrent J., Smeck N.E., Lal R. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. V. 67. P. 606–611. doi: 10.2136/sssaj2003.0606

Сведения об авторах:

Аснин Леонид Давыдович – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: asninld@mail.ru

Самойлов Михаил Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории рационального природопользования и природоподобных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: samojlov23@yandex.ru

Першина Маргарита Владимировна – аспирант кафедры «Химия и биотехнология» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: mvpersh@yandex.ru

Целищев Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия). E-mail: yu-tsl@yandex.ru

Слюсарь Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: nnslyusar@gmail.com

Троегубов Александр Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории рационального природопользования и природоподобных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: troegubov.alexandr@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Asnin Leonid D. – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russian Federaton). E-mail: asninld@mail.ru

Samoilov Mikhail S. – junior researcher, Laboratory of Rational Nature Management and Nature-Like Technologies, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russian Federaton). E-mail: samojlov23@yandex.ru

Pershina Margarita V. – Postgraduate Student, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russian Federaton). E-mail: mvpersh@yandex.ru

Zelishev Yuri G. – Candidate of Technical Sciences, Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of the RAS (Perm, Russian Federaton). E-mail: yu-tsl@yandex.ru

Slusar Natalia N. – PhD, Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russian Federaton). E-mail: nnslyusar@gmail.com

Troegubov Aleksandr S. – Junior Researcher, Laboratory of Rational Nature Management and Nature-Like Technologies, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russian Federaton). E-mail: troegubov.alexandr@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023; принята к публикации 03.07.2023

The article was submitted 17.03.2023; accepted for publication 03.07.2023