ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):18-31
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 66.081.3:628.316.12 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_18

ОПОКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИИ КАК ПРИРОДНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД: ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ И АДСОРБЦИОННО-СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА

Н.Г. Вурдова[1], Т.И. Овчинникова[1], В.Д. Мещанова[1], П.Ю. Вурдов[1]

[1] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: vurdova2019@gmail.com

Аннотация: Сорбционная доочистка относится к наиболее эффективным методам удаления биологически устойчивых загрязняющих веществ из производственных сточных вод. Актуальной задачей является расширение минерально-сырьевой базы недорогих природных сорбентов, пригодных для водоочистки. Цель работы – установление общих закономерностей химико-минералогического состава и адсорбционно-структурных свойств опок ряда месторождений Российской Федерации как основы их применения в качестве сорбентов без предварительной термохимической обработки. Исследованы образцы опок Каменноярского, Саратовского, Артемовского и Сухоложского месторождений, а также инзенский диатомит; сравнение проводили с кварцевым песком и бентонитом. Химический состав изучен методом энергодисперсионной спектроскопии, минеральный – методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии, адсорбционно-структурные характеристики – по низкотемпературным изотермам адсорбции азота (методы Брунауэра–Эммета–Теллера и Ленгмюра), сорбционная активность – по адсорбции метиленового синего. Установлена высокая однородность химического состава по породообразующим оксидам: коэффициент вариации содержания SiO_2 и Al_2O_3 не превышает 7% как в пределах месторождения, так и по классу дисперсных кремнеземов в целом. Показано, что сорбционная способность возрастает с увеличением содержания глинозема, глинистых минералов и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов и снижается с ростом содержания кремнезема. Подтвержден мезопористый характер опок (изотермы IV типа), определено влияние измельчения на пористую структуру. Обоснована возможность применения нативных опок в напорных фильтрах без термохимической модификации, что снижает себестоимость сорбента при сохранении его физико-химических свойств.

Ключевые слова: опока, дисперсные кремнеземы, природный сорбент, сточные воды, сорбционная очистка, химический состав, минеральный состав, удельная поверхность, мезопористость, адсорбция метиленового синего.

Для цитирования: *Вурдова Н. Г., Овчинникова Т. И., Мещанова В. Д., Вурдов П. Ю.* Опоки месторождений России как природные сорбенты для очистки сточных вод: химико-минералогический состав и адсорбционно-структурные свойства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 18–31. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_18.

© Н.Г. Вурдова, Т.И. Овчинникова, В.Д. Мещанова, П.Ю. Вурдов. 2026.

Opoka from Russian deposits as natural sorbent for wastewater treatment: Mineralogical and chemical compositions, adsorptive and structural properties

N.G. Vurdova[1], T.I. Ovchinnikova[1], V.D. Meshchanova[1], P.Y. Vurdov[1]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: vurdova2019@gmail.com

Abstract: Adsorptive treatment is one of the most efficient methods to remove biologically stable pollutants from production wastewater. It is urgent to increase resources of inexpensive natural sorbents suitable for water treatment. The aim of this study is to find general patterns of mineralogical and chemical compositions, and adsorptive and structural properties of opoka from a number of deposits in Russia as a basis for the opoka application as a sorbent without preliminary thermochemical treatment. The samples of opoka from the Kamenogorsk, Saratov, Artyom and Sukhoy Log deposits, as well as Inzena diatomite were investigated and compared with quartz sand and bentonite. The chemical composition analyses used the energy dispersive X-day spectroscopy, the mineralogical study used the X-ray phase analysis and electron microscopy, and the adsorptive and structural characteristics were examined using the low-temperature isothermal curves of nitrogen adsorption (Brunauer–Emmett–Teller (BET) theory and Langmuir method), and the sorption activity was investigated in adsorption of methylene blue. It is found that the chemical composition is uniform in terms of rock-forming oxides: the coefficient of variation in the contents of SiO_2 and Al_2O_3 was not higher than 7% both within a deposit and in the class of dispersion silica in general. It is shown that the adsorption capacity grows with an increase in the contents of alumina, clayey minerals, and oxides of alkaline and alkaline earth metals, and decreases with an increase in the content of silica. The mesoporous character of opoka (type IV isotherms) is proved, and the influence of grinding on the pore structure is determined. It is substantiated that native opoka is usable in pressure filters without thermochemical modification, which reduces the cost of the sorbent at preservation of physico-chemical properties.

Key words: opoka, silica dispersion, natural sorbent, wastewater, sorption treatment, chemical composition, mineral composition, specific surface, meso-porosity, adsorption of methylene blue.

For citation: Vurdova N. G., Ovchinnikova T. I., Meshchanova V. D., Vurdov P. Y. Opoka from Russian deposits as natural sorbent for wastewater treatment: Mineralogical and chemical compositions, adsorptive and structural properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):18-31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_18.

Введение

Сточные воды горнодобывающих, обогатительных и металлургических предприятий содержат загрязняющие вещества, которые не удаляются в полном объеме при механической и биохимической обработке. Для повышения степени очистки применяют дополнительную сорбционную доочистку, отличающуюся высокой эффективностью, способностью обрабатывать многокомпонентные стоки, извлекать биологически устойчивые вещества и сохранять стабильность очистки при колебаниях объема и состава сточных вод [1, 2].

Основными требованиями к сорбентам для очистки сточных вод являются устойчивость к воздействию среды, высокая сорбционная способность и достаточная механическая прочность; при этом материалы должны быть доступными, распространенными и недороги-

ми, а также экологически безопасными [1, 3]. Классический активированный уголь удовлетворяет большинству этих требований, однако его высокая стоимость и затраты на регенерацию ограничивают применение в крупнотоннажной очистке сточных вод. Перспективной альтернативой являются природные минеральные сорбенты — дисперсные кремнеземы (диатомиты, трепелы и опоки), кремнистые породы осадочного происхождения, состоящие на 60—95% из гидратированной формы кремнезема с примесями минерального и органического происхождения [4].

Опока — микрозернистая микропористая кремнистая осадочная порода, сложенная преимущественно опалом; опоки прочные, не размокают в воде, содержание SiO_2 в них достигает 92—98% при примесях кварца, полевых шпатов и глауконита [5]. По твердости (3—6 по шкале Мооса) и водостойкости опоки превосходят трепелы и диатомиты, а по развитию переходных (мезо-) пор и удельной поверхности (до 200 $м^2/г$) не уступают им. Сырьевая база опал-кристобалитового сырья в РФ значительна: по данным ФГБУ «Росгеолфонд», на 01.01.2024 зарегистрировано 62 месторождения, суммарные балансовые запасы которых (категории $A+B+C_1$) составляют около 346 млн $м^3$. Широкое распространение опок благоприятно сказывается на их доступности и логистической стоимости.

Ранее была показана перспективность применения нативных и модифицированных дисперсных кремнеземов для очистки сточных вод и водоподготовки [6—9]. Актуальность этого направления подтверждают современные зарубежные исследования опок и диатомитов, синтетических кремнеземов как эффективных сорбентов для очистки сточных вод [10—14]. Часто исследователи рекомендуют проводить дополнительную модификацию нативных пород: химическую, термическую или их комбинацию для извлечения того или иного загрязнителя [10, 15—17]. Вместе с тем использование природных дисперсных минералов во многом опирается на эмпирический подход: обобщенные закономерности связи «состав — свойства» для пород разных месторождений изучены недостаточно и не систематизированы, а факторы снижения себестоимости сорбента — в частности, отказ от энергоемких стадий измельчения и термической обработки — практически не проанализированы.

Цель работы — установить общие закономерности химико-минералогического состава и адсорбционно-структурных свойств опок ряда месторождений Российской Федерации, определяющие возможность их применения в качестве эффективных фильтрующих и сорбционных материалов без предварительной термохимической обработки. Для достижения цели решены сдедующие задачи: изучение химического и минерального состава и его однородности; определение адсорбционно-структурных характеристик и влияния измельчения; установление природы активных центров адсорбции и оценка влияния термообработки.

Полученные результаты позволили оценить применение опок в других перспективных областях, а именно, для литификации различных промышленных отходов [18—20].

Материалы и методы

Объектами исследования служили образцы опок наиболее разрабатываемых месторождений: Каменноярского (Астраханская область), Саратовского (Лысая Гора), Артемовского и Сухоложского (Свердловская область), а также диатомит Инзенского месторождения (Ульяновская область). Для сопоставле-

ния использовали кварцевый песок и бентонит. С каждого месторождения отбирали не менее 10 образцов. Исследовали фракцию 0,7 — 1,8 мм, применяемую для загрузки напорных фильтров, и порошок с крупностью частиц около 100 мкм [21].

Химический состав определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Минеральный состав и микроструктуру изучали методами рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Адсорбционно-структурные характеристики (суммарный объем и распределение пор, объем мезо- и микропор, средний диаметр пор, удельную поверхность по методам БЭТ и Ленгмюра, энергию адсорбции) рассчитывали по изотермам низкотемпературной адсорбции азота при 77 К [5]. Классификацию пор по размерам принимали согласно М.М. Дубинину и рекомендациям IUPAC: микропоры (0,6 — 2 нм), мезопоры (2 — 50 нм) и макропоры (50 — 500 нм).

Сорбционную активность материалов оценивали по величине адсорбции метиленового синего (АМС) по стандартной методике ГОСТ 30036.2-93. «Каолин обогащенный». Метод определения показателя адсорбции. Дополнительно определяли водопоглощение образцов, а также влияние прокаливания в интервале 100 — 1000 °С и термощелочной обработки на сорбционные свойства. Результаты обрабатывали методами математической статистики с расчетом средних значений, стандартного отклонения, коэффициента вариации C_v, коэффициентов корреляции Пирсона r и уравнений регрессии.

Результаты и обсуждение

Химический состав опок и его однородность

Основным породообразующим компонентом опок является кремнезем, содержание которого по месторождениям составляет 75 — 88 мас. %. Вторым по значимости компонентом служит глинозем (Al_2O_3) — 3 — 8 мас. % (в глинистых разностях до 20%), представленный алюмосиликатами и ферроалюмосиликатами (иллит, монтмориллонит, полевой шпат, глауконит). В заметных количествах присутствуют оксиды железа (III) (1,5 — 5,0%), титана (до 2%), а также кальция, магния, калия и натрия (около 1% каждого). Сравнительная характеристика структурно-сорбционных свойств дисперсных кремнеземов приведена в табл. 1.

Статистическая обработка данных ЭДС для опок Каменноярского месторождения показала, что коэффициент вариации C_v для большинства оксидов не превышает 20%, что свидетельствует о равномерном распределении компонентов в пределах месторождения; исключение составляют оксиды кальция ($20 < C_v < 40\%$). Сопоставление опок Астраханского и Саратовского месторождений выявило расхождение по ос-

Таблица 1

Структурно-сорбционные свойства дисперсных кремнеземов
Structural and sorption properties of dispersed silicas

Адсорбент	Удельная поверхность s, м^2/г	Суммарный объем пор V_Σ, см^3/г	Доля макропор, %
Опоки	≈ 200	< 0,75	< 50
Трепелы	30 — 70	0,6 — 0,8	70 — 80
Диатомиты	10 — 20	1,0 — 2,4	90 — 95

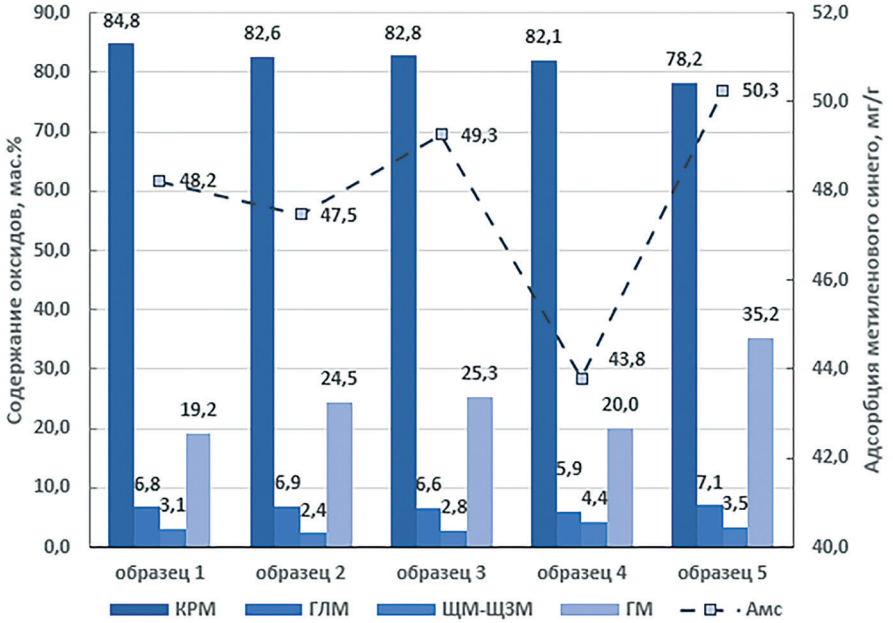


Рис. 1. Зависимость адсорбции метиленового синего от химического состава исследованных дисперсных кремнеземов

Fig. 1. Methylene blue adsorption as a function of the chemical composition of the studied dispersed silicas

новным породоопределяющим оксидам менее 2%. Для оценки влияния состава на сорбционную способность исследованы образцы дисперсных кремнеземов пяти материалов; результаты приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 подтверждают высокую однородность химического состава как в пределах одного месторождения, так и по классу дисперсных кремнеземов: коэффициент вариации для кремнезема и глинозема составляет менее 7%, тогда как для оксидов щелочных и щелочноземельных металлов и глинистых минералов он находится в диапазоне $20 < C_v < 40\%$. Расчет коэффициентов

Таблица 2

Химический состав основных компонентов дисперсных кремнеземов и адсорбция метиленового синего

Chemical composition of the main components of dispersed silicas and methylene blue adsorption

№ образца	КРМ (SiO_2), %	ГЛМ (Al_2O_3), %	ЩМ+ЩЗМ, %	ГМ, %	$A_{МС}$, мг/г
1	84,75±0,36	6,80±0,42	3,14±0,32	19,2 – 20,5	47,22±1,69
2	82,58±0,26	5,52±0,23	2,44±0,20	24,5 – 29,0	47,48±1,64
3	82,47±0,50	6,60±0,30	2,79±0,36	25,3 – 28,3	48,26±2,12
4	82,05±0,21	5,93±0,48	3,39±0,35	20,0 – 21,0	43,80±3,00
5	78,20±2,39	7,12±0,15	6,48±0,21	35,2 – 37,4	51,77±0,58
C_v, %	2,93	10,23	44,49	25,69	5,96

Примечание. КРМ – кремнезем; ГЛМ – глинозем; ЩМ+ЩЗМ – оксиды щелочных и щелочноземельных металлов (CaO+MgO+Na_2O+K_2O); ГМ – глинистые минералы; $A_{МС}$ – адсорбция метиленового синего.

корреляции Пирсона выявил устойчивые зависимости величины адсорбции метиленового синего от состава: при увеличении содержания кремнезема адсорбция снижается (r = –0,779; p < 0,001; N = 18), тогда как рост содержания глинозема (r = 0,677; 0,001 < p < 0,01), глинистых минералов (r = 0,954; p < 0,001) и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов (r = 0,931; p < 0,001) сопровождается ее повышением (рис. 1).

Выявленные зависимости описываются уравнениями регрессии второго порядка для содержания кремнезема, глинозема и щелочных металлов и линейным уравнением $A_{МС} = 0{,}334 \cdot С(ГМ) + 39{,}808$ для глинистых минералов при коэффициентах детерминации $R^2 > 0{,}80$. Таким образом, содержание кремнезема отрицательно влияет на адсорбцию катионов метиленового синего, а глинозем, глинистые минералы и оксиды щелочных и щелочноземельных металлов способствуют ее увеличению. Поскольку эти закономерности характерны для пород различных месторождений, они открывают возможность обоснованного расширения минерально-сырьевой базы адсорбентов на основе дисперсных кремнеземов [22, 23].

Минеральный состав и микроструктура

Активный (опал-кристобалитовый) кремнезем, растворимый в слабощелочных средах, содержится в опоках в количестве 50—90%, доля глинистых примесей составляет 10—40%, песчано-алевритовых включений — до 10%. Характерно наличие переходного ряда от рентгеноаморфного опала через метастабильный опал-кристобалит к α-кристобалиту и α-кварцу. Статистическая обработка данных фазового состава опок Каменноярского месторождения (табл. 3) показала однородное распределение опал-кристобалит-тридимитовой (ОКТ) фазы (C_v < 20%); глинистые минералы и кварц распределены относительно равномерно (20 < C_v < 40%), а цеолиты и полевые шпаты — неравномерно (C_v > 40%).

Опоки Поволжья характеризуются серым, желтовато-серым и голубовато-серым оттенком, слабовыраженной слоистостью и средней прочностью. По дан-

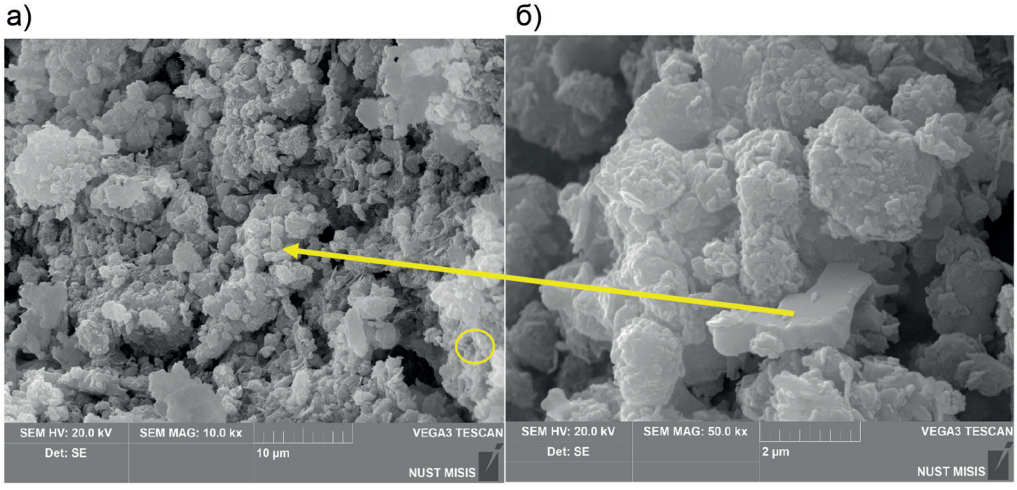


Рис. 2. СЭМ-изображения образца опоки Каменноярского месторождения при увеличении: 10 000 (а), 50 000 (б)

Fig. 2. SEM images of the Kamennoyarskoye deposit opoka sample at magnification: 10 000 (a); 50 000 (b)

Таблица 3

Фазовый состав опок Каменноярского месторождения (обобщенные показатели, N = 24)

Phase composition of opokas from the Kamennoyarskoye deposit (generalized values, N = 24)

Показатель	ОКТ	Глинистые	Кварц	Цеолит	Полевой шпат
Среднее, мас. %	70,00	14,39	5,00	11,00	0,55
min–max, %	46 – 88	8 – 19	3 – 10	0 – 33	0 – 1
C_v, %	19,05	22,34	37,17	86,02	92,80

ным СЭМ (рис. 2), исследованные образцы имеют хлопьевидно-глобулярную микроструктуру; основная масса породы (около 80%) представлена глобулярным опалом-К, образовавшимся при перекристаллизации остатков кремнистых микроорганизмов. Отмечаются агрегатно-глобулярно-кристаллические поверхности, сочетающие леписферы опала-К и кристаллы кристобалита, а также карбонатный детрит и чешуйки слюды.

Рентгенофазовый анализ (рис. 3) подтвердил полиминеральный состав пород. Наиболее интенсивны рефлексы кварца (4,24; 2,45; 2,28; 2,12; 1,54 Å); кристобалит присутствует в свободном состоянии; глинистые минералы представлены монтмориллонитом и иллитом, цеолиты — гейландитом (3,94 Å) и клиноптилолитом (8,98 Å). Постоянство ОКТ-фазы (опал-кристобалит-тридимитовая фаза) свидетельствует об относительной стабильности структурного состояния месторождения.

Адсорбционно-структурные свойства

Изотермы низкотемпературной адсорбции азота для крошки (0,7 – 1,8 мм) и порошка опоки относятся к IV типу по классификации Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (БДДТ) (рис. 4). Начальный выпуклый участок указывает на присутствие небольшого количества микропор наряду с мезо- и макропорами, а петля гистерезиса на десорбционной ветви соответствует капиллярной конденсации в мезопорах [5]. Совпадение вида кривых свидетельствует об отсутствии значимых различий

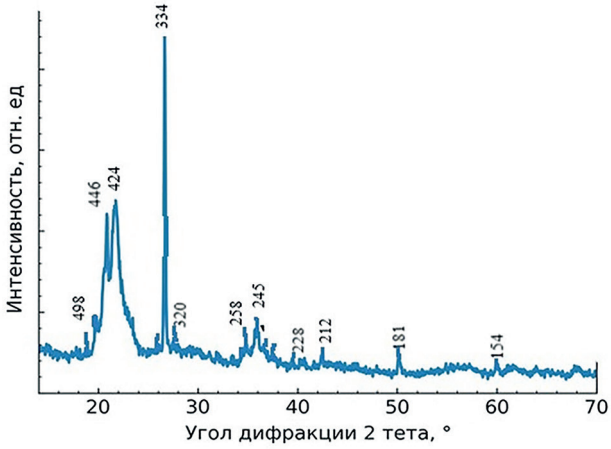


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца опоки Каменноярского месторождения
Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the Kamennoyarskoye deposit opoka sample

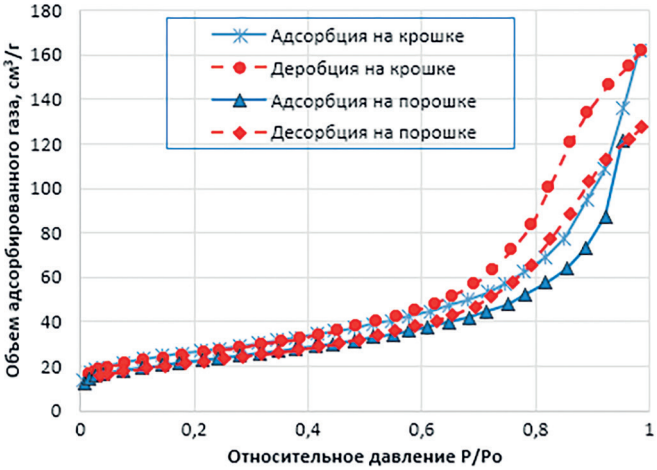


Рис. 4. Низкотемпературные изотермы адсорбции–десорбции азота для нативной опоки разной крупности

Fig. 4. Low-temperature nitrogen adsorption–desorption isotherms for native opoka of different particle sizes

в механизме адсорбции при изменении крупности материала; адсорбент является мезопористым.

Структурные и адсорбционные характеристики нативной опоки приведены в табл. 4. При измельчении теряется до 18% доступных к адсорбции пор: объем сорбирующих пор снижается с 0,251 до 0,197 см^3/г, удельная поверхность по Ленгмюру — с 158,7 до 134,6 м^2/г. Средний диаметр мезопор при этом уменьшается с 11,2 до 9,5 нм. Следовательно, для нативной породы целесообразно применять более крупные фракции.

Термощелочная обработка нативной опоки приводит к частичному закрытию микро- и мелких мезопор (менее 15 нм) при увеличении общего объема пор за счет макропор; вид изотермы становится более крутым, а петля гистерезиса практически исчезает. Однако адсорбция метиленового синего при этом возрастает незначительно — менее чем

Таблица 4

Структурные и адсорбционные характеристики нативной опоки
Structural and adsorption characteristics of native opoka

№	Показатель	Единицы измерения	Порошок	Крошка 0,7–1,8 мм
1	Суммарный объем пор	см^3/г	1,02	1,31
2	Объем сорбирующих пор	см^3/г	0,197	0,251
3	Объем мезопор	см^3/г	0,191	0,249
4	Объем микропор	см^3/г	0,005	0,003
5	Средний диаметр мезопор	нм	11,197	9,495
6	Удельная поверхность (БЭТ)	м^2/г	77,210	91,408
7	Удельная поверхность (по Ленгмюру)	м^2/г	134,571	158,661
8	Энергия адсорбции E_0	кДж/моль	5,967	5,960

Таблица 5

Влияние температуры прокаливания на адсорбцию метиленового синего ($A_{мс}$, мг/г)

Effect of calcination temperature on methylene blue adsorption ($A_{мс}$, mg/g)

Температура обработки, °С	$A_{мс}$, фракция 0,7—1,4 мм	$A_{мс}$, порошок
100	39,20	34,25
200	34,25	30,12
400	28,56	25,11
500	25,47	21,30
600	20,69	15,62
800	17,54	10,12
1000	5,61	2,32

на 20%. Поскольку рассматриваемая область применения (крупнотоннажная очистка сточных вод) накладывает эколого-экономические ограничения, термохимическая модификация признана нецелесообразной, и дальнейшие исследования выполнены на нативном материале [24, 25].

Природа активных центров адсорбции

Адсорбционная способность опок, как и дисперсных кремнеземов в целом, обусловлена наличием активных центров на поверхности, роль которых выполняют поверхностные гидроксильные (силанольные) группы. Эти группы определяют гидрофильность, растворимость, заряд, кислотно-основные свойства, способность к ионному обмену и адсорбции.

Современные представления, обобщенные в монографиях Р. Айлера, А.В. Киселева, В.И. Лыгина, Н.А. Шабановой, опираются на два подхода: согласно одному, основную роль играют поверхностные гидроксильные группы, согласно другому — адсорбция возможна также на координационно ненасыщенных атомах кремния и силанольных группах.

На поверхности кремнеземов выделяют слабокислотные и слабоосновные гидроксильные группы; наибольшей кислотностью обладают тройные группы, доля которых невелика (около 6%), но которые являются наиболее сильными в энергетическом отношении. Присутствие примесей алюминия усиливает кислотные свойства поверхности по Бренстеду и способствует адсорбции.

Для проверки роли гидроксильных групп изучено влияние прокаливания опоки на ее сорбционную активность (табл. 5). Повышение температуры обработки до 1000 °С сопровождается

Таблица 6

Влияние водопоглощения и содержания глинозема на адсорбцию метиленового синего

Effect of water absorption and alumina content on methylene blue adsorption

Порода, месторождение	Водопоглощение *W*, %	Глинозем, мас. %	$A_{мс}$, мг/г
Песок кварцевый (Волгоградский карьер)	34,15±0,50	0,30±0,10	7,15±0,65
Опока Каменноярского м-ния	59,5±0,5	6,80±0,42	47,22±1,69
Опока Саратовского м-ния	76,02±0,02	6,58±0,18	48,5±1,50
Опока Артемовского м-ния	55,2±0,18	5,93±0,48	43,80±3,00
Опока Сухоложского м-ния	71,02±0,30	7,12±0,15	51,77±0,58
Диатомит Инзенского м-ния	149,77±0,34	5,52±1,49	47,48±1,64
Бентонит Березовского м-ния	150±10	16,5±3,5	136,5±6,0

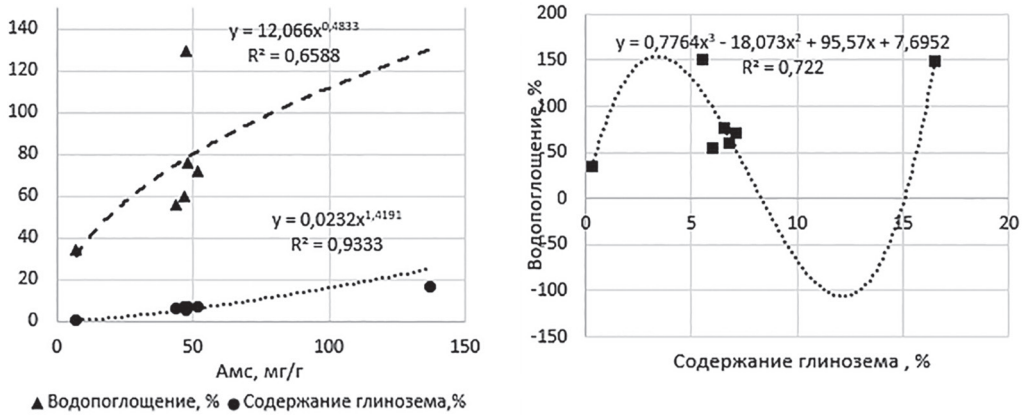


Рис. 5. Связь адсорбции метиленового синего с водопоглощением и содержанием глинозема в породах
Fig. 5. Relationship between methylene blue adsorption and the water absorption and alumina content of the rocks

снижением адсорбции метиленового синего на 85% (r = 0,979; p < 0,001; N = = 10), что связано с уменьшением количества активных гидроксильных центров вследствие дегидроксилирования поверхности [21].

После термообработки дисперсные кремнеземы не становятся гидрофобными и способны к регидроксилированию поверхности. Это подтверждается сопоставлением водопоглощения, содержания глинозема и адсорбции метиленового синего для ряда пород (табл. 6).

Между величиной адсорбции и водопоглощением установлена положительная корреляция (r = 0,824; p < 0,001), между адсорбцией и содержанием глинозема — r = 0,992 (p < 0,001), между водопоглощением и содержанием глинозема — r = 0,776 (рис. 5). Полученные зависимости описываются уравнениями $A_{МС} = 12{,}066 \cdot W^{0{,}48}$ и $A_{МС} = 0{,}023 \cdot C^{1{,}42}$ при R^2 = 0,66 — 0,93.

Совокупность полученных данных показывает, что нативные опоки, обладающие высокими показателями адсорбции при умеренной проницаемости, целесообразно применять без предварительной термической обработки в качестве загрузки напорных фильтров для доочистки сточных вод.

Заключение

1. Установлена высокая однородность химического состава опок ряда месторождений Российской Федерации: коэффициент вариации содержания SiO_2 и Al_2O_3 не превышает 7% как в пределах месторождения, так и по классу дисперсных кремнеземов в целом; для оксидов щелочных и щелочноземельных металлов и глинистых минералов C_v находится в диапазоне 20 — 40%.

2. Показано, что сорбционная способность опок по отношению к катионам метиленового синего возрастает с увеличением содержания глинозема, глинистых минералов и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов и снижается с ростом содержания кремнезема; зависимости описываются уравнениями регрессии с R^2 > 0,80 и характерны для пород разных месторождений.

3. Основными породообразующими минералами опок являются глобулярный опал-К (около 80%) при наличии кварца, глинистых минералов (монтмориллонит, иллит) и цеолитов (гейландит, клиноптилолит); постоянство ОКТ-фазы указывает на стабильность структурного состояния месторождения.

4. Опоки являются мезопористыми адсорбентами (изотермы IV типа); при

измельчении теряется до 18% доступных к адсорбции пор и снижается удельная поверхность, поэтому для нативной породы предпочтительны более крупные фракции.

5. Определяющую роль в адсорбции играют поверхностные гидроксильные группы: прокаливание до 1000 °C снижает адсорбцию метиленового синего на 85%; установлены корреляции адсорбции с водопоглощением (r = 0,824) и содержанием глинозема (r = 0,992).

6. Обоснована возможность применения нативных опок без термохимической модификации в качестве эффективных и недорогих фильтрующих сорбентов для доочистки производственных сточных вод, что создает предпосылки для расширения минерально-сырьевой базы адсорбентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вурдова Н. Г.* Принцип эколого-экономической сбалансированности в развитии водного хозяйства крупного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 2. — С. 28—42. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_28.

2. *Al Aqad K. M., Abdelnaby M. M., Tanimu A., Abdulazeez I., Elsharif A. M.* Adsorbent materials for water treatment: a review of current trends and future challenges // Environmental Pollution and Management. 2025, vol. 2, pp. 1—13. DOI: 10.1016/j.epm.2024.12.003.

3. *Тарасевич Ю. И.* Природные сорбенты в процессах очистки воды. — Киев: Наукова думка, 1981. — 208 с.

4. *Природные* сорбенты СССР / Под ред. У. Г. Дистанова. — М.: Недра, 1990. — 208 с.

5. *Чукин Г. Д.* Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. — М.: Принта, 2008. — 172 с.

6. *Салахутдинова А. Р.*, *Алыков Н. М.*, *Алыков Н. Н.* Установка для очистки воды с использованием сорбента на основе опок Астраханской области // Экология и промышленность России. — 2014. — № 5. — С. 8—12. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-5-8-12.

7. *Коростелева Ю. А.*, *Фетюхина Е. Г.*, *Игнарина Л. М.* Сорбент на основе диатомита Диамикс Аква — эффективная и выгодная альтернатива угольным фильтрам в очистке вод электростанций // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2020. — № 6. — С. 44—51.

8. *Иванова Л. А.*, *Просеков А. Ю.*, *Иванов П. П.*, *Михайлова Е. С.*, *Тимощук И. В.*, *Горелкина А. К.* Оценка эффективности очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных твердых частиц с использованием различных фильтрующих материалов // Горное дело и технология. — 2024. — № 9(3). — С. 263—270. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-227.

9. *Abu Khadra M. R.*, *Eid M. H.*, *Allam A. A.*, *Ajarem J. S.*, *Almalki A. M.*, *Salama Y.* Evaluation of different forms of Egyptian diatomite for the removal of ammonium ions from Lake Qarun: A realistic study to avoid eutrophication // Environmental Pollution. 2020, vol. 266, pt. 2, article 115277. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115277.

10. *Muntean S. G.*, *Nistor M. A.*, *Nastas R., Petuhov O.* Dyes and heavy metals removal from aqueous solutions using raw and modified diatomite // Processes. 2023, vol. 11, no. 8, article 2245. DOI: 10.3390/pr11082245.

11. *Gonfa G., Kidanu A., Akram S., Basant L., Kezembayeva G., Bokov D., Asghari A., Yadav K., Saravanan A., Hosseini-Bandegharaei A.* Adsorptive removal of Cr(VI) from water using silver nanoparticle modified-diatomite nanocomposite // Scientific Reports. 2025, vol. 15, article 41993. DOI: 10.1038/s41598-025-25998-y.

12. *Bizhanova G., Abdibattayeva M., Ping W., Mussina U., Kurbanova L., Zhumazhanov A., Akhmetzhanova D., Doszhanov O., Ismukhanbetov B., Bolatova D., Doszhanov Y.* Efficient removal of ammonium nitrogen from aquatic systems using thermally and alkali-modified diatomite and zeolite // Water. 2026, vol. 18, no. 9, article 1104. DOI: 10.3390/w18091104.

13. *Alsar Zh., Duskinova B., Insepov Z.* New sorption properties of diatomaceous earth for water desalination and reducing salt stress of plants // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2020, vol. 22, no. 2, pp. 89—97. DOI: 10.18321/ectj955.

14. *Hussein E. B.*, *Rasheed F. A.*, *Mohammed A. S.*, *Kayani K. F.* Emerging nanotechnology approaches for sustainable water treatment and heavy metals removal: a comprehensive review // RSC Advances. 2025, vol. 15, no. 48, article 41061. DOI: 10.1039/D5RA06914A.

15. *Gondek K., Micek P., Baran A., Bajda T., Kowal J., Lis M., Wyrobisz-Papiewska A., Wojtysiak D., Smoron K.* Modified natural diatomite with various additives and its environmental potential // Materials. 2023, vol. 16, no. 12, article 4494. DOI: 10.3390/ma16124494.

16. *Zawadzka B., Siwiec T., Reczek L., Marzec M., Jóźwiakowski K.* Modeling of phosphate sorption process on the surface of Rockfos® material using langmuir isotherms // Applied Sciences. 2024, vol. 14, no. 23, article 10996. DOI: 10.3390/app142310996.

17. *Makarski M., Piotrowska K., Żbikowski A., Pawłowski K., Rygało-Galewska A., Szmidt M., Łozicki A., Niemiec T.* Silica–calcite sedimentary rock (opoka) enhances the immunological status and improves the growth rate in broilers exposed to ochratoxin A in feed // Animals. 2024, vol. 14, no. 1, article 0024. DOI: 10.3390/ani14010024.

18. *Вурдова Н. Г.*, *Куликова Е. Ю.* Утилизация опасных шламов литификацией опоками // Строительство и техногенная безопасность. — 2024. — № 35 (87). — С. 81—87. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-35-81-87.

19. *Вурдова Н. Г.*, *Абуова Г. Б.*, *Боронина Л. В.*, *Захаров С. С.*, *Радченко О. П.*, *Фролов М. А.* Исследование характеристик гетероповерхностных композиционных сорбентов на основе вторичного сырья // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — № 2 (95). — С. 133—142. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_133.

20. *Vurdova N. G.*, *Ovchinnikova T. I.*, *Tertychnaya S. V.*, *Kulikova A. A.*, *Meshchanova V. D.*, *Vurdov P. Y.*, *Birman Y. A.*, *Krotova M. V.*, *Yakusheva A. A.* An innovative technical solution for the extraction and disposal of hazardous industrial waste for landfill decommissioning // Environments. 2026, vol. 13, no. 5, article 0272. DOI: 10.3390/environments13050272.

21. *Антонинова Н. Ю.*, *Собенин А. В.*, *Усманов А. И.*, *Кузнецова Я. А.* Об основных параметрах безотходной технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании разработки медноколчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12-1. — С. 90—103. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_90.

22. *Михайлова Е. С.*, *Тимощук И. В.*, *Горелкина А. К.*, *Семенова С. А.* Изучение состояния поверхности сорбентов АС и МС после элиминации анионов из сточных вод предприятий угледобычи // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 27—40. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-27-40.

23. *Апакашев Р. А.*, *Малышев А. Н.*, *Лебзин М. С.*, *Курмачева В. С.*, *Гордеева Ю. Ф.* Влияние кислотности среды на десорбцию ионов меди (II) из природных сорбентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 12-1. — С. 22—33. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_22.

24. *Овчинникова Т. И.*, *Серянина А. В.*, *Соколова А. А.*, *Тертычная С. В.* Оценка геоэкологических рисков как элемент управления экологической безопасностью на металлургических предприятиях // Черные металлы. — 2024. — № 8. — С. 71—76. DOI: 10.17580/chm.2024.08.08.

25. *Куликова Е. Ю.*, *Баловцев С. В.*, *Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205—216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216. ГИАБ

REFERENCES

1. Vurdova N. G. Principle of environmental and economic balance in water management at a large company. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 2, pp. 28—42. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_28.

2. Al Aqad K. M., Abdelnaby M. M., Tanimu A., Abdulazeez I., Elsharif A. M. Adsorbent materials for water treatment: a review of current trends and future challenges. *Environmental Pollution and Management*. 2025, vol. 2, pp. 1—13. DOI: 10.1016/j.epm.2024.12.003.

3. Tarasevich Yu. I. *Prirodnye sorbenty v protsessakh ochistki vody* [Natural sorbents in water purification processes], Kiev, Naukova dumka, 1981, 208 p.

4. *Prirodnye sorbenty SSSR*. Pod red. U. G. Distanova [Natural sorbents of the USSR. Distanov U. G. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1990, 208 p.

5. Chukin G. D. *Khimiya poverkhnosti i stroenie dispersnogo kremnezema* [Surface chemistry and structure of dispersed silica], Moscow, Printa, 2008, 172 p.

6. Salakhutdinova A. R., Alykov N. M., Alykov N. N. The plant for water treatment using sorbent on the base of flask of Astrakhan oblast. *Ecology and Industry of Russia*. 2014, no. 5, pp. 8 — 12. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-5-8-12.

7. Korosteleva Yu. A., Fetyukhina E. G., Ignarina L. M. Diamix aqua diatomite-based sorbent as an effective and cost-efficient alternative to carbon filters in power-plant water treatment. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2020, no. 6, pp. 44 — 51. [In Russ].

8. Ivanova L. A., Prosekov A. Yu., Ivanov P. P., Mikhaylova E. S., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K. Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(3), pp. 263 — 270. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-227.

9. Abu Khadra M. R., Eid M. H., Allam A. A., Ajarem J. S., Almalki A. M., Salama Y. Evaluation of different forms of Egyptian diatomite for the removal of ammonium ions from Lake Qarun: a realistic study to avoid eutrophication. *Environmental Pollution*. 2020, vol. 266, pt. 2, article 115277. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115277.

10. Muntean S. G., Nistor M. A., Nastas R., Petuhov O. Dyes and heavy metals removal from aqueous solutions using raw and modified diatomite. *Processes*. 2023, vol. 11, no. 8, article 2245. DOI: 10.3390/pr11082245.

11. Gonfa G., Kidanu A., Akram S., Basant L., Kezembayeva G., Bokov D., Asghari A., Yadav K., Saravanan A., Hosseini-Bandegharaei A. Adsorptive removal of Cr(VI) from water using silver nanoparticle modified-diatomite nanocomposite. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 41993. DOI: 10.1038/s41598-025-25998-y.

12. Bizhanova G., Abdibattayeva M., Ping W., Mussina U., Kurbanova L., Zhumazhanov A., Akhmetzhanova D., Doszhanov O., Ismukhanbetov B., Bolatova D., Doszhanov Y. Efficient removal of ammonium nitrogen from aquatic systems using thermally and alkali-modified diatomite and zeolite. *Water*. 2026, vol. 18, no. 9, article 1104. DOI: 10.3390/w18091104.

13. Alsar Zh., Duskinova B., Insepov Z. New sorption properties of diatomaceous earth for water desalination and reducing salt stress of plants. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2020, vol. 22, no. 2, pp. 89 — 97. DOI: 10.18321/ectj955.

14. Hussein E. B., Rasheed F. A., Mohammed A. S., Kayani K. F. Emerging nanotechnology approaches for sustainable water treatment and heavy metals removal: a comprehensive review. *RSC Advances*. 2025, vol. 15, no. 48, article 41061. DOI: 10.1039/D5RA06914A.

15. Gondek K., Micek P., Baran A., Bajda T., Kowal J., Lis M., Wyrobisz-Papiewska A., Wojtysiak D., Smoron K. Modified natural diatomite with various additives and its environmental potential. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 12, article 4494. DOI: 10.3390/ma16124494.

16. Zawadzka B., Siwiec T., Reczek L., Marzec M., Jóźwiakowski K. Modeling of phosphate sorption process on the surface of Rockfos® material using langmuir isotherms. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 23, article 10996. DOI: 10.3390/app142310996.

17. Makarski M., Piotrowska K., Żbikowski A., Pawłowski K., Rygało-Galewska A., Szmidt M., Łozicki A., Niemiec T. Silica–calcite sedimentary rock (opoka) enhances the immunological status and improves the growth rate in broilers exposed to ochratoxin A in feed. *Animals*. 2024, vol. 14, no. 1, article 0024. DOI: 10.3390/ani14010024.

18. Vurdova N. G., Kulikova E. Yu. Disposal of hazardous sludge by lithification with opokas. *Construction and industrial safety*. 2024, no. 35 (87), pp. 81 — 87. [In Russ]. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-35-81-87.

19. Vurdova N. G., Abuova G. B., Boronina L. V., Zakharov S. S., Radchenko O. P., Frolov M. A. Study of the characteristics of heterosurface composite sorbents based on secondary raw materials. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024, no. 2 (95), pp. 133 — 142. [In Russ]. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_133.

20. Vurdova N. G., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V., Kulikova A. A., Meshchanova V. D., Vurdov P. Y., Birman Y. A., Krotova M. V., Yakusheva A. A. An innovative technical solution for the extraction and disposal of hazardous industrial waste for landfill decommissioning. *Environments*. 2026, vol. 13, no. 5, article 0272. DOI: 10.3390/environments13050272.

21. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Kuznetsova Ya. A. On the main parameters of waste-free technology for wastewater treatment from heavy metals in the design of the development of

copper-crusted deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-1, pp. 90 — 103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_90.

22. Mikhaylova E. S., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K., Semenova S. A. Study of the surface condition of AC and MS sorbents after the elimination of anions from wastewater from coal mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 27 — 40. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-27-40.

23. Apakashev R. A., Malyshev A. N., Lebzin M. S., Kurmacheva V. S., Gordeeva Yu. F. The effect of environmental acidity on copper (II) ions desorption from natural sorbents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 12-1, pp. 22 — 33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_22.

24. Ovchinnikova T. I., Seryanina A. V., Sokolova A. A., Tertychnaya S. V. Assessment of geoecological risks as an element of environmental safety management at metallurgical enterprises. *Chernye metally*. 2024, no. 8, pp. 71 — 76. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2024.08.08.

25. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 — 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вурдова Надежда Георгиевна[1] — д-р техн. наук,
профессор, EMBA, e-mail: nadya_vurdova@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-4624-1569,
Овчинникова Татьяна Игоревна[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5849-6473,
Мещанова Валерия Дмитриевна[1] — аспирантка,
e-mail: Meschanova.valera@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2832-7709,
Вурдов Петр Юрьевич[1] — аспирант,
e-mail: prod@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0003-4302-8783,
[1] НИТУ МИСИС.
Для контактов: Вурдова Н.Г., e-mail: vurdova2019@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.G. Vurdova[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, EMBA,
e-mail: nadya_vurdova@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-4624-1569,
T.I. Ovchinnikova[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5849-6473,
V.D. Meshchanova[1], Graduate Student,
e-mail: Meschanova.valera@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2832-7709,
P.Y. Vurdov[1], Graduate Student, e-mail: prod@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0003-4302-8783,
[1] NUST MISIS, 119991, Moscow, Russia.
Corresponding author: N.G. Vurdova, e-mail: vurdova2019@gmail.com.

Получена редакцией 01.09.2026; получена после рецензии 21.09.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 01.09.2026; received after the review 21.09.2026; accepted for printing 10.11.2026.