

Код МРНТИ 87.21.07

\*Д.К. Сунакбаева<sup>1</sup>, Д.Х. Юлдашбек<sup>1</sup>, К.У. Айтекова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави  
(г. Туркестан, Казахстан),

<sup>2</sup>Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы  
(г. Тараз, Казахстан)

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН УРАНГАЙСКОГО И ИБАТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

**Аннотация.** Бентонитовые глины являются перспективными природными сорбентами для решения экологических задач, таких как детоксикация почв от тяжелых металлов и очистка сточных вод. В работе представлены результаты изучения бентонитов Урангайского и Ибатинского месторождений Туркестанской области Казахстана. Определены химический и минералогический состав, гранулометрические характеристики, сорбционные свойства и влияние химической активации. Глины обладают высокой сорбционной способностью (удельная поверхность 78–180 м<sup>2</sup>/г, катионообменная емкость 63–100 мг-экв/100 г). В опытах с модельной системой почва-кукуруза смеси бентонита с гуминовой кислотой и агроотходами снижали содержание тяжелых металлов в урожае до нормативных уровней. Полученные данные обосновывают применение местных минеральных ресурсов для охраны окружающей среды в маловодных регионах.

**Ключевые слова:** бентонитовая глина, сорбент, монтмориллонит, тяжелые металлы, детоксикация почв, химическая активация.

**Ораңғай және Ибата кен орындарының бентонит саздарының физика-химиялық сипаттамалары және олардың экологиялық технологияларда қолданылуы**

**Андатпа.** Бентонит саздары ауыр металдармен ластанған топырақты детоксикациялау мен ағын суларды тазартуда тиімді табиғи сорбент болып табылады. Бұл жұмыста Түркістан облысындағы Ораңғай және Ибата кен орындарының бентониттері кешенді зерттелді. Олардың химиялық және минералдық құрамы, гранулометриялық сипаттамалары, сорбциялық қасиеттері және химиялық активтендірудің әсері анықталды. Саздардың сорбциялық қабілеті жоғары (меншікті беті 78–180 м<sup>2</sup>/г, катионалмасу сыйымдылығы 63–100 мг-экв/100 г). Топырақ-жүгері жүйесінде жүргізілген тәжірибелерде бентонит, гумин қышқылы және ауыл шаруашылығы қалдықтары қосылған қоспалар ауыр металдардың өнімдегі мөлшерін нормативтік деңгейге дейін төмендетті. Нәтижелер жергілікті минералдарды су ташылығы бар өңірлердің экологиялық ахуалын жақсартуға тиімді пайдалануға болатынын көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** бентонит сазы, сорбент, монтмориллонит, ауыр металдар, топырақ детоксикациясы, химиялық активтендіру.

**Physico-chemical characteristics of bentonite clays from the Urangai and Ibata deposits and their application in environmental technologies**

**Abstract.** Bentonite clays are promising natural sorbents for addressing environmental challenges such as soil detoxification from heavy metals and wastewater treatment. This study presents the results of investigating bentonites from the Urangai and Ibata deposits in the Turkestan region of Kazakhstan. The chemical and mineralogical composition, granulometric characteristics, sorption properties, and the effect of chemical activation were determined. The clays exhibit high sorption capacity (specific surface area of 78–180 m<sup>2</sup>/g, cation exchange capacity of 63–100 mg-eq/100 g). In experiments using a model soil-corn system, mixtures of bentonite with humic acid and agricultural waste reduced the heavy metal content in the crop to regulatory levels. The results justify the use of local mineral resources for environmental protection in water-scarce regions.

**Key words:** bentonite clay, sorbent, montmorillonite, heavy metals, soil detoxification, chemical activation.

### Введение

На современном этапе антропогенного развития обостряются проблемы, связанные с нарушением биогеохимического равновесия почвенно-экологических систем. Интенсивное природопользование, урбанизация, промышленная деятельность, нерациональное применение минеральных удобрений и пестицидов приводят к деградации почвенного покрова, исчерпанию его ресурсного потенциала, нарушению структуры и снижению буферной способности. Одним из наиболее опасных и трудноустраняемых видов загрязнения является техногенное накопление тяжелых металлов (ТМ) в верхнем слое почвы. Эти элементы не разлагаются в природных условиях, демонстрируют высокую подвижность и биодоступность, накапливаются в растениях, водоемах и трофических цепях, что создает серьезные риски для экосистем и здоровья человека [1].

Особую опасность представляет собой наличие тяжелых металлов в зоне корнеобитаемого слоя, где они могут включаться в метаболические процессы растений и микробных сообществ, изменять кислотно-щелочной баланс, ингибировать ферментативную активность и блокировать механизмы минерализации органического вещества. В условиях засушливых регионов, таких как Туркестанская об-

ласть Республики Казахстан, почвы особенно уязвимы к техногенному воздействию ввиду ограниченной водообеспеченности, слабой промывной способности, повышенной солевой нагрузки и малой буферности. Это обостряет необходимость разработки эффективных природосберегающих решений по восстановлению химического баланса и минимизации миграции токсикантов в системе почва-вода-растение [2–3].

Среди доступных и экологически безопасных средств для детоксикации загрязненных почв все большую популярность приобретают природные алюмосиликатные сорбенты. Одним из наиболее эффективных представителей данной группы являются бентонитовые глины, основным минералогическим компонентом которых является монтмориллонит – представитель группы смектитов. Структурно монтмориллонит относится к типу слоистых силикатов с формулой 2:1, где два слоя кремнезема окружают один слой алюмооксидной октаэдрической решетки. Такая структура обуславливает высокую удельную поверхность (до 800 м<sup>2</sup>/г), способность к межслоевому ионному обмену, набуханию, удержанию воды и поливалентных ионов [4–5].

Ключевым преимуществом монтмориллонита является его высокая катионообменная емкость (ЕКО), позво-

ляющая фиксировать значительные количества тяжелых металлов, препятствуя их дальнейшей миграции и включению в биологический круговорот. Кроме того, благодаря своей структурной пластичности и способности к модификации (кислотной, щелочной, органической), бентонитовые глины могут адаптироваться под конкретные условия загрязненной среды, усиливая селективность к определенным типам поллютантов. В международной практике природные и модифицированные смектиты находят широкое применение в технологиях ремедиации, водоподготовки, создания барьерных экранов, биоценологической стабилизации и улучшения структурно-функциональных характеристик почв [6–7].

На территории Туркестанской области имеются природные месторождения бентонитовых глин, обладающие значительным потенциалом для экологических и инженерных применений. Урангайское месторождение, выявленное и разведанное в 1972 году, содержит запасы порядка 6,8 млн м<sup>3</sup> и расположено всего в 12 км от города Туркестан и 18 км от города Кентау, в предгорьях хребта Каратау. Второе – Ибатинское месторождение характеризуется схожими геолого-минералогическими условиями и выгодным географическим положением вблизи транспортной инфраструктуры, что упрощает возможную эксплуатацию и логистику. Несмотря на доступность и геолого-экономические преимущества, указанные месторождения остаются слабо исследованными в контексте их прикладного применения в качестве природных сорбентов для связывания тяжелых металлов в почвенной среде [8].

На сегодняшний день отсутствует комплексная информация о минералогическом составе, морфологии, текстурных и сорбционных характеристиках глин из этих месторождений. Недостаточно изучены такие важные параметры, как гранулометрический состав, специфическая поверхность, пористость, распределение кислотно-основных центров, устойчивость к химическим воздействиям, а также поведение при взаимодействии с поллютантами различной природы. Также требует оценки влияние химической модификации (например, активации кислотами, солями или органическими агентами) на изменение их сорбционной активности и устойчивости в условиях, имитирующих реальные почвенные системы [9].

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в проведении комплексной физико-химической характеристики бентонитовых глин Урангайского и Ибатинского месторождений, а также в научной оценке их потенциала в качестве природных сорбентов для фиксации тяжелых металлов в загрязненных почвах. Это включает не только изучение исходных свойств глин, но и моделирование их поведения в условиях, приближенных к реальным экологическим ситуациям, с целью последующего применения в стратегиях восстановления и устойчивого управления почвенными ресурсами в засушливых регионах Казахстана.

### Материалы и методы

Исследования проведены на пробах бентонитовых глин Урангайского (УГ) и Ибатинского (ИГ) месторождений. Химический состав определен методом гравиметрическо-

го анализа. Гранулометрический состав – методом седиментации по П.А. Зенкову. Физические свойства (объемный вес, удельный вес, пористость) измерены по ГОСТ 26423-85. Удельная поверхность ( $S$ ) и сорбционный объем ( $V_s$ ) рассчитаны методом БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера) по адсорбции азота. Емкость катионного обмена (ЕКО) – методом выщелачивания аммоний-ацетатом.

Химическая активация УГ выполнена обработкой 5–30% растворами  $H_2SO_4$  в течение 24 ч. с последующей промывкой и сушкой. Минералогический анализ – рентгеноструктурным методом (РСА) и оптическим методом в шлифах.

Для моделирования фиксации ТМ использованы сероземы, загрязненные солями **Cu**, **Zn**, **Pb** (1–100 ПДК). Эффективность сорбентов оценивалась по снижению pH, гН<sub>2</sub> и содержания ТМ в почве и кукурузе после внесения смесей бентонита с гуминовой кислотой (ГК), отходами риса и пшеницы (дозы: 5–10% от массы почвы). Анализ ТМ – инверсионной вольтамперометрией [10–11]. Статистическая обработка – методом дисперсионного анализа ( $n = 5$ ,  $P < 0,05$ ).

### Результаты

#### Химический и минералогический состав

**Урангайская глина (УГ).** По данным химического анализа, основной компонент глины – диоксид кремния ( $SiO_2$ ), составляющий 55,72%, что подтверждает преобладание кремнеземистой матрицы. Суммарное содержание глинозема ( $Al_2O_3 + TiO_2$ ) составляет 13,60%, оксидов железа ( $Fe_2O_3 + FeO$ ) – 5,29%, а также присутствуют щелочноземельные ( $CaO$  – 2,94%,  $MgO$  – 2,43%) и щелочные оксиды ( $K_2O + Na_2O$  – 3,65%). Содержание серных соединений варьируется в диапазоне 0,98–3,05% ( $SO_4^{2-}$ ). Наличие гумуса (1,54%) указывает на частичное органическое обогащение, а потери при прокаливании (ППП) – 8,91% на наличие летучих и связанной воды.

**Физико-химические характеристики.** Объемная насыпная масса составляет 594 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение за 1 час – 11%, что подтверждает гидрофильность материала.

**Ибатинская глина (ИГ).** Минералогический состав определяется преобладанием диоктаэдрического монтмориллонита (65–87%), обуславливающего высокую сорбционную активность. Емкость катионного обмена (ЕКО) достигает 70 мг-экв/100 г, где доминируют катионы  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ .

По данным рентгеновской спектральной аналитики (РСА), выявлены следующие сопутствующие фазы: йодерит – 16%, клинфторит-1М – 29%, могонит – 55% (в пересчете на  $SiO_2$ ).

**Минералогия УГ.** Основу составляют монтмориллонит (65–75%) и гидрослюды, с примесями мусковита, биотита и каолинита (в совокупности < 5%). Установлена типичная структура 2:1 (диоктаэдрическая) с расширяющимся межслоевым пространством, активным при гидратации.

#### Гранулометрический и физические свойства

Гранулометрический анализ УГ показал высокий процент мелкодисперсных частиц. Распределение по фракциям (% от сухой массы):

- 0,5–0,05 мм – 10,7%;
- 0,05–0,01 мм – 15,2%;

- 0,01–0,005 мм – 12,3%;
- 0,005–0,001 мм – 34,0%;
- < 0,001 мм – 27,8%.

Общее содержание глинистой фракции (< 0,005 мм) составляет 61,8%, а коллоидной (< 0,2–0,3 мкм) – до 85%, что указывает на высокий потенциал к сорбции. Набухание глины в воде достигает 12–17 крат, что типично для монтмориллонитовых систем.

Физические свойства УГ представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Физические свойства бентонитовой глины  
Урангайского месторождения**

Кесте 1

**Ораңгай кен орны бентонит сазының физикалық қасиеттері**

Table 1

**Physical properties of bentonite clay from the Urangai deposit**

Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная плотность, г/см <sup>3</sup>		Пористость	
	истинный	кажущийся	%	см <sup>3</sup> /г
1,180	2,5921	1,350	46	0,321
1,176	2,6013	1,350	47	0,300
1,159	2,6442	1,491	45	0,295
1,120	2,7029	1,522	43	0,280
1,180	2,6167	1,509	44	0,315

Данные указывают на высокую пористость (43–47%), плотную структуру с истинным удельным весом ~2,6 г/см<sup>3</sup> и значительное содержание пор, особенно микропор, влияющих на удельную сорбционную емкость.

**Сорбционные свойства**

Удельная поверхность УГ варьируется от 69 до 132 м<sup>2</sup>/г, в среднем 125 м<sup>2</sup>/г, что подтверждает значительную активную поверхность (таблица 2). Предельный сорбционный объем ( $V_s$ ) находится в пределах 0,16–0,25 см<sup>3</sup>/г.

Таблица 2

**Удельная поверхность (S) и предельный сорбционный объем (V<sub>s</sub>) Урангайской бентонитовой глины**

Кесте 2

**Ораңгай бентонит сазының меншікті беті (S) және шекті сорбциялық көлемі (V<sub>s</sub>)**

Table 2

**Specific surface area (S) and maximum sorption volume (V<sub>s</sub>) of Urangai bentonite clay**

S, м <sup>2</sup> /г	V <sub>s</sub> , см <sup>3</sup> /г	Обменный комплекс, мг-экв/100 г глины			
		Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	ЕКО
78	0,17	48	33	9	80
120	0,22	50	41	8	100
69	0,16	32	25	6	63
132	0,25	54	33	6	93
130	0,25	39	32	7	78

В обменном комплексе преобладают катионы Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>. Суммарная катионообменная емкость (ЕКО) составляет 63–100 мг-экв/100 г, что делает глину эффективной при фиксации ТМ. Водородный показатель (рН) водной суспензии – 7,5–7,7, в солевом растворе – 6,8–7,0, что указывает на нейтральную реакцию среды.

Состав водной вытяжки приведен в таблице 3.

Таблица 3

**Состав водной вытяжки Урангайского бентонита, %**

Кесте 3

**Ораңгай бентонитінің сулы сығындысының құрамы, %**

Table 3

**Composition of the aqueous extract of Urangai bentonite, %**

Сухой остаток	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>
5,280	0,120	2,090	0,482	0,148	0,020	2,982
5,101	0,115	2,120	0,490	0,130	0,038	3,108
5,238	0,094	2,156	0,478	0,140	0,030	1,980
4,998	0,102	2,108	0,485	0,150	0,041	2,795
5,644	0,089	2,110	0,500	0,162	0,022	3,020

Основные анионы – Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, а катионы – Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. Высокое содержание солей (сухой остаток ~5%) указывает на наличие водорастворимых ионов, которые могут участвовать в ионном обмене.

**Влияние химической активации**

При обработке УГ серной кислотой (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) наблюдается рост содержания SiO<sub>2</sub> до 66,3% и снижение количества полуторных оксидов до 10,2%, что свидетельствует о частичном разрушении алюмосиликатной решетки. Это приводит к увеличению микропористости и развитию сорбционной поверхности.

Структурные изменения приведены в таблице 4.

При увеличении концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (до 30%) общая пористость возрастает до 69,4%, а сорбционный объем по воде – почти в 2 раза (с 0,16 до 0,33 см<sup>3</sup>/г), по бензолу – более чем в 4 раза (до 0,62 см<sup>3</sup>/г). Это подтверждает значительное увеличение микропористости, особенно в гидрофобной фазе.

**Фиксация тяжелых металлов в почвах**

Изменение рН серозема под действием различных соединений меди, цинка и свинца приведено в таблице 5.

Сульфатные и хлоридные формы меди и цинка при дозах ≥ 50 ПДК резко понижают рН (до 4,3–5,1), что увеличивает подвижность ТМ. Оксидные формы оказывают меньшее влияние на рН, оставаясь в нейтральной зоне.

Содержание ТМ в растениях и почве после применения сорбентов приведено в таблице 6.

Добавление бентонита в смеси с гуминовыми кислотами (ГК) и агропромышленными отходами (рисовая/пшеничная солома) позволяет существенно снизить содержание Pb, Cu и Zn в растительной массе кукурузы. Например, при загрязнении Pb (500 мг/кг), содержание его в растении падает с 80,3 мг/кг до 0,3–1,2 мг/кг, а в почве – до < 0,01 мг/кг. Это свидетельствует о высокой эффективности фиксирующих свойств бентонита.

Таблица 4

Структурно-сорбционные свойства Урангайского бентонита после активации  $H_2SO_4$  (24 ч)

Кесте 4

Ораңгай бентонитінің  $H_2SO_4$ -пен активтендірілгеннен кейінгі құрылымдық-сорбциялық қасиеттері (24 сағат)

Table 4

Structural and sorption properties of Urangai bentonite after  $H_2SO_4$  activation (24 h)

Концентрация кислоты, %	Насыпная плотность порошка, г/см <sup>3</sup>	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>		Общая пористость (P), %	Суммарный объем пор (V <sub>Σ</sub> ) см <sup>3</sup> /г	Статическая активность (V <sub>s</sub> ), см <sup>3</sup> /г	
		истинный (d)	кажущийся (δ)			по воде	по бензолу
-	1,180	2,644	1,521	45,5	0,30	0,16	0,14
5	0,845	2,622	1,483	46,0	0,37	0,44	0,24
10,0	0,762	2,596	1,33	55,2	0,48	0,34	0,32
20,0	0,654	2,358	1,04	63,7	0,80	0,31	0,36
25,0	0,631	2,255	0,88	67,5	0,93	0,33	0,45
30,0	0,627	2,104	0,77	69,4	0,98	0,28	0,62

Таблица 5

Изменение pH серозема при внесении соединений тяжелых металлов (1-100 ПДК)

Кесте 5

Ауыр металдар қосылыстары (1-100 ШРК) енгізілген кезде сұр топырақтың pH деңгейінің өзгерісі

Table 5

Change in pH of sierozem under the application of heavy metal compounds (1-100 MAL)

Количество внесенных ТМ	pH почвенного раствора (числитель) и rH <sub>2</sub> (знаменатель) при внесении следующих соединений ТМ			
	нитраты	сульфаты	хлориды	оксиды
Медь				
Контроль	7,3/31,2	7,3/31,2	7,3/31,2	7,3/31,2
1 ПДК	7,2/31,5	7,0/32,4	7,0/32,3	7,3/31,0
10 ПДК	7,0/31,8	6,6/33,1	6,7/33,0	7,0/31,7
50 ПДК	6,9/31,6	5,1/33,5	5,0/32,6	7,0/31,5
100 ПДК	6,5/32,3	4,3/33,7	4,5/29,7	7,0/32,5
Цинк				
Контроль	7,2/29,4	7,2/30,1	7,2/28,9	7,2/30,1
1 ПДК	7,2/29,9	7,0/30,2	7,1/29,0	7,2/30,1
10 ПДК	7,1/30,4	6,9/30,1	6,8/28,4	7,2/30,2
50 ПДК	7,0/30,3	6,6/31,4	6,5/30,1	7,2/30,2
100 ПДК	6,8/30,4	6,4/30,9	6,2/30,3	7,2/30,2
Свинец				
Контроль	7,3/29,4	7,3/29,4	7,3/30,2	7,3/30,0
1 ПДК	7,3/30,0	7,3/29,3	7,2/30,2	7,2/29,9
10 ПДК	7,1/30,0	7,3/29,4	7,0/30,8	7,2/30,1
50 ПДК	7,1/30,2	7,3/29,1	7,0/30,9	7,4/29,7
100 ПДК	7,0/30,5	7,3/29,3	7,1/31,1	7,3/29,7

Таблица 6

Содержание тяжелых металлов в кукурузе и почвах после внесения сорбентов

Кесте 6

Ауыр металдардың сорбенттер енгізілген кезде жүгері мен топырақ құрамындағы мөлшері

Table 6

Content of heavy metals in corn and soil following sorbent application

Концентрация ТМ	Содержание тяжелых металлов, мг/кг			
	Без сорбентов (кукуруза / почва)	Бентонит + отходы риса (кукуруза / почва)	Бентонит + ГК (кукуруза / почва)	Бентонит + отходы пшеницы (кукуруза / почва)
Pb (500 мг/кг)	80,3 / 518,4	1,2 / 0,4	0,8 / 0,3	0,3 / < 0,01
Cu (250 мг/кг)	22,8 / 270,6	9,1 / 6,8	5,9 / 6,6	0,2 / 0,2
Zn (300 мг/кг)	7,7 / 312,2	6,9 / 2,7	5,5 / 2,7	3,7 / 1,6

**Обсуждение**

Полученные данные по химическому, минералогическому и физико-химическому составу Урангайской (УГ) и Ибатинской (ИГ) глин демонстрируют их высокий потенциал в качестве природных сорбентов для целей экологической ремедиации, особенно в условиях загрязнения тяжелыми металлами (ТМ).

*Минералогическая характеристика и влияние структуры*

Основу как Урангайской, так и Ибатинской глины составляет монтмориллонит (65–87%) – представитель смектитовой группы с типичной 2:1-слоистой структурой. Это обеспечивает:

- наличие расширяемого межслоевого пространства, активного при гидратации;
- высокую степень набухания (до 17-кратного увеличения объема);
- развитие микропористости и коллоидных свойств, особенно в УГ (коллоидная фракция до 85%).

Такая структура способствует эффективному ионному обмену и сорбции ионов тяжелых металлов, органических соединений и других загрязнителей. Особо важным является наличие диоктаэдрического монтмориллонита, что указывает на стабильность структуры при гидратации и высокую емкость катионного обмена.

*Химический состав: возможности для ионного обмена*

Глинистая матрица представлена преимущественно диоксидом кремния ( $SiO_2$  до 66,3% после активации) и глиноземом ( $Al_2O_3$ ), с примесями железа, кальция, магния, калия и натрия. Эти элементы образуют сложную алюмосиликатную решетку, способную к ионному обмену, особенно в условиях кислотной активации.

• Суммарное содержание оксидов  $CaO + MgO$  достигает 5,37%, а щелочных оксидов ( $K_2O + Na_2O$ ) – 3,65%, что свидетельствует о наличии природных обменных катионов.

• Присутствие гумуса в УГ (1,54%) повышает аффинитет глины к органическим соединениям и металлоорганическим комплексам, что особенно важно при сорбции комплексных форм ТМ.

*Сорбционные и физико-химические свойства*

Показатели сорбционной емкости Урангайской глины особенно высоки:

- Удельная поверхность – до  $132 \text{ м}^2/\text{г}$  (в среднем  $\sim 125 \text{ м}^2/\text{г}$ );
- Катионообменная емкость (ЕКО) –  $63\text{--}100 \text{ мг-экв}/100 \text{ г}$ ;
- Предельный сорбционный объем ( $V_d$ ) – до  $0,25 \text{ см}^3/\text{г}$ ;
- Общая пористость – 43–47%.

Эти характеристики делают глину высокоэффективным сорбентом. Кроме того, значительное содержание микропор и наличие обменных катионов ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) обеспечивает фиксацию ТМ за счет механизма ионного обмена.

*Влияние кислотной активации*

Обработка УГ растворами  $H_2SO_4$  приводит к значительному изменению текстурных и сорбционных характеристик:

- рост содержания  $SiO_2$  до 66,3% и уменьшение  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$ ;
- увеличение удельной поверхности и пористости (до 69,4%);

• рост сорбционного объема по воде в 2 раза, по бензолу – в 4 раза (до  $0,62 \text{ см}^3/\text{г}$ ).

Это свидетельствует о разрушении алюмосиликатной решетки и формировании дополнительной микропористости, что расширяет диапазон адсорбируемых веществ от гидрофильных до гидрофобных.

*Буферные свойства и устойчивость к ТМ*

Эксперименты по моделированию загрязнений сероземов различными формами ТМ (нитрат, сульфат, хлорид, оксид) показали, что:

- оксидные формы ТМ незначительно влияют на pH почвы, не нарушая кислотно-щелочной баланс;
- сульфатные и хлоридные формы меди и цинка вызывают заметное подкисление среды (pH до 4,3–5,1 при 100 ПДК), что увеличивает подвижность ТМ;
- однако при использовании сорбентов, особенно бентонита в сочетании с ГК и агроотходами, достигается резкое снижение содержания ТМ в растениях и почвах (например,  $Pb$ : с 518,4 до  $< 0,01 \text{ мг}/\text{кг}$  в почве и с 80,3 до  $0,3 \text{ мг}/\text{кг}$  в растениях).

*Эффективность комбинации бентонита с органическими добавками*

Применение смешанных сорбентов на основе бентонита с гуминовыми кислотами (ГК), рисовой или пшеничной соломой значительно повышает эффективность фиксации ТМ:

- за счет сочетания механизмов адсорбции, комплексообразования и осаждения;
- органические компоненты усиливают удержание ТМ в виде нерастворимых комплексов;
- такая комбинация снижает биодоступность ТМ, препятствуя их поступлению в растения.

**Заключение**

Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность Урангайской (УГ) и Ибатинской (ИГ) глин в качестве природных сорбентов для экологической ремедиации, особенно в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Минералогическая основа в виде монтмориллонита с развитой 2:1-слоистой структурой, высокая степень набухания, значительное содержание глинистой и коллоидной фракции, а также крупная удельная поверхность (до  $132 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и высокая катионообменная емкость (до 100 мг-экв/100 г) обуславливают способность этих глин эффективно фиксировать широкий спектр ионов.

Химическая активация Урангайской глины серной кислотой усиливает ее сорбционные свойства за счет увеличения микропористости, удельной поверхности и статической активности, что расширяет спектр потенциально адсорбируемых загрязнителей от гидрофильных до гидрофобных.

Эксперименты по фиксации ТМ в почве и растениях показывают, что применение УГ в комбинации с органическими материалами (гуминовые кислоты, агроотходы) обеспечивает комплексный механизм сорбции: ионный обмен, комплексообразование и осаждение. Это позволяет значительно снижать содержание ТМ в почвах (например, содержание  $Pb$  – с 518,4 до  $< 0,01 \text{ мг}/\text{кг}$ ) и в растениях ( $Pb$  – с 80,3 до  $0,3 \text{ мг}/\text{кг}$ ).

Таким образом, Урангайская и Ибатинская глины, особенно после химической активации и в сочетании с органическими добавками, представляют собой перспектив-

ные, доступные и экологически безопасные материалы для рекультивации загрязненных почв и снижения биодоступности тяжелых металлов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чэнь Х., Ван Х., Сон Ю., Чи Ю. (2024). Обзор исследований о влиянии антропогенных воздействий на взаимодействие растений, почвы и микроорганизмов в пастбищных экосистемах: на основе перспектив выпаса скота и туризма. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122890> (на английском языке)
2. Барра Караччоло А., Теренци В. (2021). Микробные сообщества ризосферы и тяжелые металлы. *Microorganisms*. <https://doi.org/10.3390/microorganisms90714623> (на английском языке)
3. Сун С., Ву П., Ван Г., Конг Х. (2022). Загрязнение тяжелыми металлами снижает стабильность сетей совместного обитания микроорганизмов в ризосфере местных растений. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.979922> (на английском языке)
4. Переломов Л., Герцен М., Бурачевская М., Хемалата С., Виджаялакшми А., Переломова И., Атрощенко Ю. (2024). Органоглины на основе бентонита и различных типов поверхностно-активных веществ в качестве восстановителей тяжелых металлов. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16114804> (на английском языке)
5. Лю Х., Фу Т., Сарвар М.Т., Ян Х. (2023). Последние достижения в области адсорбции радионуклидов материалами на основе бентонита в качестве идеальных адсорбентов и буферных/засыпочных материалов. *App. Clay Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106796> (на английском языке)
6. Синту Ван, Янхуэй Сюй, Цинь Оу, Вэньвен Чен, Уолтер ван дер Меер, Ган Лю. (2024). Характеристики и механизмы адсорбции водорастворимых полимеров (ПВП и ПЭГ) на минералах каолин и монтмориллонит. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133592> (на английском языке)
7. Превращение природных ресурсов в передовые решения: вклад адсорбентов на основе глины в адсорбцию диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) / Алтаф Ф. [и др.] // *Trans. Tianjin Univ.* 2025. № 31. С. 74–130 (на английском языке)
8. Закиров М., Аззамова И., Норматова Н., Бегимкулов Д., Очил Г., Джулиев М. (2023). Бентонитовые глины Центральных Кызылкумов, их вещественный состав и инженерно-геологические свойства, Узбекистан. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338601006> (на английском языке)
9. Шоканов А., Манакова И., Верецак М., Мигунова А. (2024). Характеристика глин Казахстана методами Мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min14070713> (на английском языке)
10. Саинова Г.А., Калиева Н.А., Юлдашбек Д.Х., Акбасова А.Д. (2023). Влияние биогуруса и различных концентраций свинца на ферментативную активность сероземных почв Казахстана. *Scientifica (Kaup)*. <https://doi.org/10.1155/2023/8490234> (на английском языке)
11. Оценка эффективности биостабилизации в улучшении геотехнических характеристик деградированных почв аридных территорий Казахстана / Сунакбаева Д.К. [и др.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2025. Т. 4 (472). С. 295–311 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Чен Х., Ван Х., Сонг Ю., Чи Ю. (2024). Антропогендік бұзылулардың жайылымдық экожүйелердегі өсімдік-топырақ-микроорганизмдердің өзара әрекеттесуіне әсері туралы зерттеулерге шолу: жайылым және туризм перспективаларына негізделген. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122890> (ағылшын тілінде)
2. Барра Караччоло А., Теренци В. (2021). Ризосфералық микробтық қауымдастықтар және ауыр металдар. *Microorganisms*. <https://doi.org/10.3390/microorganisms90714623> (ағылшын тілінде)
3. Sun S., Wu P., Wang G., Kong X. (2022). Ауыр металдардың ластануы жергілікті өсімдіктердің ризосферасындағы микробтардың қатар жүретін желілерінің тұрақтылығына әсері. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.979922> (ағылшын тілінде)
4. Переломов Л., Герцен М., Бурачевская М., Хемалата С., Виджаялакшми А., Переломова И., Атрощенко Ю. (2024). Бентонит негізіндегі органикалық желімдер және ауыр металдарды қалпына келтіретін беттік активті заттардың түрлері. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16114804> (ағылшын тілінде)
5. Лю Х., Фу Т., Сарвар М.Т., Ян Х. (2023). Бентонит негізіндегі материалдар арқылы радионуклидтердің адсорбциялануындағы соңғы жетістіктер идеалды адсорбенттер

және буферлік/толтырғыш материалдар ретінде. *App. Clay Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106796> (ағылшын тілінде)

6. Синту Ван, Янхуэй Сю, Цин Оу, Вэнвэн Чен, Уолтер ван дер Меер, Ган Лю. (2024). Каолин мен монмориллонит минералдарындағы суда еритін полимерлердің (PVP және PEG) адсорбциялық сипаттамалары мен механизмдері. *Journal of Hazardous Materials.* <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133592> (ағылшын тілінде)
7. Табиғи ресурстарды озық шешімдерге айналдыру: Саз негізіндегі адсорбенттердің көмірқышқыл газының (CO<sub>2</sub>) адсорбциясына қосқан үлесі / Алтаф Ф. [және т. б.] // *Trans. Tianjin Univ.* 2025. № 31. Б. 74–130 (ағылшын тілінде)
8. Закиров М., Агзамова И., Норматова Н., Бегимкулов Д., Очилов Г., Джулиев М. (2023). Орталық Қызылқұмның бентонит саздары және олардың материалдық құрамы мен инженерлік-геологиялық қасиеттері, Өзбекстан. *E3S Web of Conferences.* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338601006> (ағылшын тілінде)
9. Шоканов А., Манакова И., Верещак М., Мигунова А. (2024). Қазақстандық саздардың Мессбауэр спектроскопиясы және рентгендік дифракция әдісі бойынша сипаттамасы. *Minerals.* <https://doi.org/10.3390/min14070713> (ағылшын тілінде)
10. Саинова Г.А., Калиева Н.А., Юлдашбек Д.Х., Акбасова А.Д. (2023). Қазақстанның сұр топырағының ферментативті белсенділігіне вермикомпост пен қорғасынның әр түрлі концентрациясының әсері. *Scientifica (Каир).* <https://doi.org/10.1155/2023/8490234> (ағылшын тілінде)
11. Қазақстанның шөлейтті аумақтарындағы деградацияға ұшыраған топырақтардың геотехникалық қасиеттерін жақсартуда биостабилизацияның тиімділігін бағалау / Сунакбаева Д.К. [және т. б.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.* 2025. Т. 4 (472). Б. 295–311 (ағылшын тілінде)

#### REFERENCES

1. Chen X., Wang X., Song Y., Chi Y. (2024). A Review of Studies on the Effects of Anthropogenic Disturbances on Plant-Soil-Microorganism Interactions in Grassland Ecosystems: Based on Grazing and Tourism Perspectives. *Agronomy.* <https://doi.org/10.3390/agronomy14122890> (in English)
2. Barra Caracciolo A., Terenzi V. (2021). Rhizosphere Microbial Communities and Heavy Metals. *Microorganisms.* <https://doi.org/10.3390/microorganisms90714623> (in English)
3. Sun C., Wu P., Wang G., Kong X. (2022). Heavy metal pollution decreases the stability of microbial co-occurrence networks in the rhizosphere of native plants. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.979922> (in English)
4. Perelomov L., Gertsen M., Burachevskaya M., Hemalatha S., Vijayalakshmi A., Perelomova I., Atrashchenko Y. (2024). Organoclays Based on Bentonite and Various Types of Surfactants as Heavy Metal Remedants. *Sustainability.* <https://doi.org/10.3390/su16114804> (in English)
5. Liu H., Fu T., Sarwar M.T., Yang H. (2023). Recent progress in radionuclides adsorption by bentonite-based materials as ideal adsorbents and buffer/backfill materials. *App. Clay Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106796> (in English)
6. Xintu Wang, Yanghui Xu, Qin Ou, Wenwen Chen, Walter van der Meer, Gang Liu. (2024). Adsorption characteristics and mechanisms of water-soluble polymers (PVP and PEG) on kaolin and montmorillonite minerals. *Journal of Hazardous Materials.* <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133592> (in English)
7. Transforming Natural Resources into Advanced Solutions: The Contribution of Clay-Based Adsorbents to Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Adsorption / Altaf F. [et al.] // *Trans. Tianjin Univ.* 2025. No. 31. 74–130 pp. (in English)
8. Zakirov M., Agzamova I., Normatova N., Begimkulov D., Ochilov G., Juliev M. (2023). Bentonite clays of the Central Kyzylkum and their material composition and engineering and geological properties, Uzbekistan. *E3S Web of Conferences.* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338601006> (in English)
9. Shokanov A., Manakova I., Vereshchak M., Migunova A. (2024). Characterization of Kazakhstan's clays by Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction. *Minerals.* <https://doi.org/10.3390/min14070713> (in English)
10. Sainova G.A., Kaliyeva N.A., Yuldashbek D.Kh., Akbasova A.D. (2023). The Influence of Vermicompost and Various Concentrations of Lead on the Enzymatic Activity of Sierozem Soils of Kazakhstan // *Scientifica (Cairo).* <https://doi.org/10.1155/2023/8490234> (in English)
11. Yuldashbek D.Kh., Aitekova K., Nurmakova S.M., Waris M. (2025) Assessment of the effectiveness of biostabilization in improving the geotechnical properties of degraded soils in the arid regions of Kazakhstan / Sunakbaeva D.Kh. [et al.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.* 2025. V. 4 (472). 295–311 pp. (in English)

**Сведения об авторах:**

**Сунакбаева Д.К.**, к. т. н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), [dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz](mailto:dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0009-0006-3727-4891>

**Юлдашбек Д.Х.**, магистр химии, ст. научный сотрудник НИИ «Экология», Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), [davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz](mailto:davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0000-0001-9342-7502>

**Айтекова К.У.**, к. т. н., ассистент профессора, Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан), [Aytekova1972@mail.ru](mailto:Aytekova1972@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8439-944X>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

**Сунакбаева Д.К.**, т. ғ. к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

**Юлдашбек Д.Х.**, химия магистрі, «Экология» ҒЗИ-ның аға ғылыми қызметкері, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

**Айтекова К.У.**, т. ғ. к., профессордың ассистенті, Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті (Тараз қ., Қазақстан)

**Information about the authors:**

**Sunakbaeva D.K.**, candidate of technical sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

**Yuldashbek D.Kh.**, Master of Chemistry, Senior Researcher of the Research Institute «Ecology», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

**Aitekova K.U.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Sherkhan Murtaza International Taraz University (Taraz, Kazakhstan)

# ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА



## ПОДПИСКА' 2026 РЕКЛАМНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОТРУДНИЧЕСТВО

POST-DTS@YANDEX.KZ / +7 747 343 15 02 / MINMAG.KZ