

Код МРНТИ 87.23.91

\*А.А. Исмаилова<sup>1</sup>, Н. Жалгасулы<sup>1</sup>, Н. Уайсулы<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан),

<sup>2</sup>Алматинский метрополитен (г. Алматы, Казахстан)

## ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Аннотация.** Антропогенное воздействие на природу нарушает приобретенную в процессе эволюции способность к ее саморегулированию. Видимые искусственные изменения в природной среде приводят к коренным изменениям связей в экосистемах. Горнодобывающее предприятие непременно нарушает экоравновесие в регионе и в частности наиболее раннюю подземную гидросистему. В результате обнажений рудных тел под воздействием кислорода воздуха и атмосферных осадков интенсивно развиваются окислительные процессы. Образовавшиеся вследствие окисления легко растворимые соединения с ливневыми и паводковыми водами попадают в подземные и поверхностные источники, загрязняя их. Приводятся результаты исследований по реабилитации пластовых вод после подземного скважинного выщелачивания металлов с использованием природных сорбентов (бурый уголь, гумат натрия, бентонитовая глина и шунгитосодержащие алюмосиликаты).

**Ключевые слова:** руда, пластовые воды, обезвреживание, бурый уголь, гумат натрия, бентонитовая глина, шунгиты.

### Кен өндіруде жерасты суын залалсыздандыру

**Аңдатпа.** Кен алуа антропогендік әсер ету жерасты суынның табиғи тазарту процесін күрделендіреді. Тау-кен өндіру кәсіпорны аймақтағы экологиялық тепе-теңдікті, атап айтқанда, ең осал жерасты гидрожүйесінің бүлінуіне әкеп соғады. Кен денелеріне әсер ету нәтижесінде атмосфералық оттегі мен жауын-шашынның әсерінен тотығу процестері қарқынды дамиды. Тотығу нәтижесінде түзіліп оңай еритін қосылыстар жаңбыр және тасқын сулары бар жерасты және жерүсті көздеріне араласып, оларды ластайды. Дегенмен, біздің зерттеуіміз микроорганизмдердің элементтердің кен денелерінен ерітінділерге өтуіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді. Табиғи сорбенттер (қоңыр көмір, натрий гуматы, бентонит сазы және құрамында шунгит бар алюмосиликаттар) арқылы металдарды жер асты ұңғымаларын шаймалаудан кейін қабат суларын қалпына келтіру бойынша зерттеулердің нәтижелері берілген.

**Түйінді сөздер:** кен, қабат сулары, бейтараптандыру, қоңыр көмір, натрий гуматы, бентонит сазы, шунгит.

### Neutralization of groundwater during mining operations

**Abstract.** Anthropogenic impact on nature disrupts its ability to self-regulate acquired in the process of evolution. Visible artificial changes in the natural environment lead to fundamental changes in the connections in ecosystems. A mining enterprise inevitably disrupts the ecological balance in the region and, in particular, the most vulnerable underground hydrosystem. As a result of exposure of ore bodies, under the influence of atmospheric oxygen and precipitation, oxidation processes develop intensively. Easily soluble compounds formed as a result of oxidation enter underground and surface sources with rain and flood waters, polluting them. The article presents the results of studies on the rehabilitation of formation waters after underground borehole leaching of metals using natural sorbents (brown coal, sodium humate, bentonite clay and shungite-containing aluminosilicates).

**Key words:** ores, formation waters, neutralization, brown coal, sodium humate, bentonite clay, shungites.

### Введение

Под воздействием различного рода оксидов металлов в результате физико-химического взаимодействия формируются сложный анионно-катионный состав, концентрация тяжелых металлов и превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК) для вод, используемых в питьевых и хозяйственных целях. Накапливается значительное количество сульфатов, хлоридов, гидрокарбонатов железа, алюминия, нитратов, радионуклидов и других микроэлементов. Попадание опасных компонентов в подземные воды хозяйственно-питьевого назначения может привести к серьезным экологическим последствиям.

Вследствие снижения величины pH за счет выпадающих в осадок растворенных элементов, где главными являются гидроксиды железа и алюминия, формируется так называемый кольматационный барьер. На этом барьере за счет уменьшения порового пространства значительно снижается фильтрационная способность водоносного горизонта [1].

Снижение фильтрационных свойств за счет образования комплекса вышеназванных барьеров приводит к тому, что естественный фильтрационный поток, имея слишком малые скорости движения, не может разрушить сформированный замкнутый контур и обтекает заключенную в нем линзу техногенных растворов по периферии.

Реабилитация подземных вод является одной из главных задач, особенно эта проблема актуальна тогда, когда водоносный горизонт служит объектом водопользования. Производственный опыт, например, подземного скважинного выщелачивания металлов показывает, что возможна естественная реабилитация пластовых вод. При этом снижение минерализации остаточных растворов происходит

вследствие гидравлической дисперсии, молекулярной диффузии, физико-химических реакций взаимодействия с вмещающими породами, а также механической сорбции и простого ионного обмена. Однако, как показывает опыт, естественная деминерализация пластовых вод протекает медленно. Для полного восстановления исходных параметров требуется 15–20 лет. Когда существует необходимость реабилитации качества подземных вод в кратчайшие сроки, то необходимо прибегать к искусственным методам очистки, которые, в свою очередь, можно разделить на две группы.

*Первая группа* предусматривает извлечение остаточных растворов из недр и их очистку от вредных веществ на поверхности. При этом используется весь арсенал методов химической технологии – сорбция на ионообменных смолах, экстракция, электродиализ, флотация и вымораживание, концентрирование выпариванием и многие другие.

Эти методы чрезвычайно дорогостоящи, утилизация отдельных ценных компонентов не компенсирует всех затрат. При этом на поверхности накапливаются значительные массы не утилизируемых вредных веществ [2].

*Вторая группа* методов ориентирована на нейтрализацию растворов непосредственно в недрах. Здесь используются следующие приемы: вытеснение остаточных растворов сжатым воздухом в окружающие породы и электрохимические методы очистки *in situ*; нейтрализация растворов на месте залегания содой; восстановление металлов растворами сульфата натрия; микробиологические методы очистки путем внедрения рудоносных горизонтов культивированной на поверхности естественной микрофлоры; перекачку остаточных растворов из рудоносного горизонта на нижележащие горизонты с высокой нейтра-

лизирующей восстановительной способностью литологической среды и др. Все эти технологии, к сожалению, сложно реализуемы, требуют значительных затрат.

Более ускоренной реабилитацией пластовых вод является использование различных сорбентов, способствующих сорбировать химические соединения и металлы, которыми обладают также природные минералы и горные породы. Здесь рассматривается возможность очистки остаточных растворов после техногенного химического воздействия на пластовые воды путем введения природных сорбентов непосредственно в водоносный горизонт.

### Основные методы исследований

Для исследования использовали бурый уголь, шунгит-содержащие алюмосиликатные сланцы и бентонитовую глину. Бурый уголь использовали в природном виде, а также подвергнутый пиролизу (прокаливанию без доступа воздуха в течение 1 часа при температуре 600–650 °С) для удаления летучих веществ и серы. Исследования проводили на модельных растворах, содержащих сульфат железа, сульфат меди и сульфат цинка.

Были подготовлены растворы (мг/л) с различной концентрацией компонентов: раствор (мг/л):

№ 1 – Fe – 250; Cu – 250; Zn 250;  $\sum SO_4$  – 2124;

№ 2 – Fe – 1000; Cu – 1000; Zn – 1000;  $\sum SO_4$  – 8500.

Эксперименты проводили в две стадии. На первой стадии использовали модельный раствор с концентрацией металлов 250 мг/л, на второй – раствор с концентрацией 1000 мг/л.

Эксперименты проводили в статическом режиме и температура среды при экспериментах поддерживалась в пределах 25–30 °С, поскольку такой режим наблюдается и в производственных условиях.

Соотношение Т:Ж при экспериментах было принято равным 1:2. Время сорбции в экспериментах составляло 3, 6, 12, 18 и 24 часа при перемешивании. Раствор с сорбентом периодически перемешивали. По окончании заданного времени сорбции жидкую фазу отфильтровывали под вакуумом и проводили ее химический анализ.

### Результаты исследований и их обсуждение

При этом необходимо отметить, что рекультивация подземных вод в широких промышленных масштабах ни в Казахстане, ни в странах ближнего и дальнего зарубежья не производилась. Осуществлены многочисленные исследования на уровне опытных и опытно-промышленных работ в республиках СНГ (Узбекистан, Казахстан, Украина) и в США [3].

Ниже приводится краткое описание основных способов и результатов их применения для реабилитации подземных вод при выщелачивании полезных ископаемых.

1. Способ промывки недр. Применительно к сернокислотному методу ПСВ способ промывки прошел исследования в лабораторных условиях и частично проверялся в опытно-промышленном порядке на месторождении Уванас в Казахстане.

2. Вытеснение остаточных растворов сжатым воздухом. Способ проходил проверку также на опытном участке месторождения Уванас. Опытный блок был круговой

формы с радиусом 50 м, мощность продуктивного горизонта около 10 м, активная пористость 0,2, общая минерализация остаточных растворов 23 г/л. Закачка воздуха производилась в 6 скважин с общим средним расходом 600÷700 м<sup>3</sup>/час, откачка остаточных растворов – из трех скважин, расположенных в центре участка с суммарным средним дебитом 6÷8 м<sup>3</sup>/час. В процессе опыта велся контроль над расходом воздуха по нагнетательным скважинам, дебитам растворов, уровнем подземных вод и положением границы раздела воздух-раствор в контуре опытного участка.

В течение 150 суток нагнетания воздуха одновременно было откачено около 10 тыс. м<sup>3</sup> остаточных растворов, что составило более 85% порового объема участка. Концентрация урана в них в 8÷10 раз превысила начальную его концентрацию в остаточных растворах. Дебит откачных скважин в процессе опыта практически вдвое превышал дебит этих скважин в обычных условиях. По положению границы раздела воздух-вода можно было заключить, что вытеснение жидкости шло довольно равномерно по всему внутреннему контуру опытного участка. Ход опыта показал, что в данных геолого-гидрогеологических условиях возможно извлечение за один цикл вытеснения до 90% остаточных растворов. Можно также отметить снижение стоимости данного способа в связи с получением дополнительного количества урана.

Из второй группы способов рекультивации горизонтов применительно к ПСВ нитрат велась разработки очистки растворов на поверхности с применением технологии реагентного осаждения и в недрах на основе использования электросорбции [4–5].

3. Способ реагентной очистки остаточных растворов на поверхности предусматривает сооружение комплекса химических производств по реагентному осаждению компонентов загрязненных вод. При одном из химических методов – известковании происходит очистка растворов от ионов железа, алюминия и группы ионов, способных осаждаться с соответствующими гидроокислами. Минерализация раствора после известкования снижается до 2÷6 г/л и в основном определяется наличием в растворе сульфата кальция.

Изменение состава растворов после химической подготовки и после электродиализной переработки. Результаты экспериментов при концентрации тяжелых металлов в растворе 250 мг/л, соотношение Т:Ж = 1:2 приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, железо, медь и цинк при концентрации их в растворе 250 мг/л и соотношении Т:Ж = 1:2 практически полностью сорбируются из раствора бурым углем, подвергнутым пиролизу и бентонитовой глиной. Бурый уголь в природном виде поглощает металлы несколько хуже. Наименьшие показатели сорбции металлов из раствора наблюдаются при сорбции шунгитсодержащими алюмосиликатными сланцами. Это можно объяснить низким содержанием в породе минерала шунгита, который, как известно из литературных источников, обладает хорошими сорбционными свойствами (содержание углерода в породе составляет всего 5–8%).

*Состав растворов после химической предподготовки*  
*Химиялық алдынала және электродиализді өңдеулерден кейінгі түрі*  
*Composition of solutions after chemical pre-treatment*

Таблица 1  
Кесте 1  
Table 1

Определяемый компонент	Остаточный серно-кислый раствор, мг/л	Раствор после химической обработки, мг/л	Дилуат (электродиализ), мг/л
Калий	160	150	1,46÷5,8
Натрий	860	3500	135÷465
Кальций	452	440	1,6÷3,2
Магний	700,8	655	Н.о
Железо общее	568,1	Н.о	Н.о
Аммоний	37,5	35,7	Н.о
Алюминий	729	Н.о	Н.о
Сульфат	10560	9360	120,6÷577,7
Хлорид	307,9	183	10,0÷18,4
Нитрат	650	590	9,4÷27,0
pH	2,25	10,5	9,25÷9,9
Общая минерализация	15025	14914	278÷1100

Переработка образующейся при известковании суспензии осуществляется флотацией, так как процесс сгущения в данных условиях неэффективен вследствие плохого уплотнения гидроокислов. Твердые отходы, полученные после вакуум-фильтрации, подлежат захоронению, поскольку содержат радиоактивные компоненты.

4. Технология очистки остаточных растворов в недрах с применением электросорбции предусматривает создание в толще продуктивного горизонта электрического поля с помощью электродов. При этом положительно заряженный электрод (анод) также через скважину (или систему скважин для нескольких анодов) вводят в глины, а катод в отработанную рудную залежь [6–7].

В работе Садуакасовой А.Т. [8] рассмотрены физико-химические закономерности процесса сорбции металлов из водных растворов и характеристики неорганических и органических сорбентов для извлечения урана из водных растворов. Недостатками органических сорбентов является их дороговизна.

По результатам литературного обзора в качестве сорбентов, использованных в работе, обоснованно выбраны природные шунгит и цеолит с учетом их дешевизны в сравнении с органическими сорбентами и больших запасов шунгита и цеолита в их месторождениях.

По результатам экспериментов определяли степень очистки раствора от каждого компонента и сорбционную емкость сорбентов по различным компонентам растворов и суммарную сорбционную емкость. Величину степени очистки определяли по выражению:

$$\varepsilon = \frac{a_{исх}^i - a_{кон}^i}{a_{исх}^i} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $a^i$  – исходная концентрация компонента в растворе, мг/л;

$a_{кон}^i$  – конечная концентрация  $i$ -го компонента в растворе,  $м^3$ .

Сорбционную емкость определяли по выражению:

$$N = \frac{(a_{исх}^i - a_{кон}^i) \cdot V_i}{Q}, \quad м^3, \quad (2)$$

где  $V$  – объем раствора,  $м^3$ ;

$Q$  – масса сорбента, г.

При пиролизе же бурого угля сера удаляется вместе с другими летучими веществами. Поскольку первая серия опытов показала низкую эффективность сорбции компонентов раствора шунгитсодержащими алюмосиликатными сланцами, а бурый уголь в природном виде не освобождает раствор от сульфат-иона, во второй серии эксперименты проводились только с бурым углем, подвергнутым пиролизу, и с бентонитовой глиной.

Результаты серии экспериментов при концентрации металлов в растворе 1000 мг/л приведены в таблице 3.

Как видно из графиков, бурый уголь, подвергнутый пиролизу, и бентонитовая глина при такой концентрации металлов в растворе хорошо поглощают как металлы, так и сульфат-ион.

Эффективность очистки вод природными сорбентами зависит от их сорбционной емкости. Характеристика сорбционной емкости бурого угля, подвергнутого пиролизу, и бентонитовой глины приведена на графиках рис. 1 и 2.

Сравнительная суммарная сорбционная емкость пиролизованного бурого угля и бентонитовой глины в зависимости от времени сорбции показана на графике 3.

Как видно из графиков, суммарная сорбционная емкость бурого угля, подвергнутого пиролизу, и бентонитовой глины практически одинаковы.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что природные сорбенты такие, как бурый уголь, подвергнутый пиролизу, и бентонитовая глина могут быть использованы для реабилитации пластовых вод, подвергшихся техногенному воздействию путем их введения непосредственно в водоносный пласт. При этом природный сорбент

Таблица 2

*Изменение концентрации ионов в растворе в зависимости от времени сорбции при концентрации металлов в растворе 250 мг/м<sup>3</sup>*

Кесте 2

*250 мг/м<sup>3</sup> ерітіндідегі металл концентрациясында сорбция уақытына байланысты ерітіндідегі иондар концентрациясының өзгеруі*

Table 2

*Change in the concentration of ions in the solution depending on the sorption time at a metal concentration in the solution of 250 mg/m<sup>3</sup>*

Вид сорбента, соотношение Т:Ж	Время сорбции, час	Содержание ионов в растворе, мг/л			
		<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	$\Sigma SO_4$
Исходный бурый уголь, 1:2	0	250,0	250,0	250,0	2124,0
	3	24,6	21,5	20,0	2760,0
	6	15,2	17,9	18,9	2850,0
	12	12,7	17,5	18,1	2775
	18	11,8	16,8	17,9	2682
	24	10,0	1,67	17,6	2555,0
Пиролизированный бурый уголь, 1:2	0	250,0	250,0	250,0	2124,0
	3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	851,0
	6	< 0,01	< 0,01	< 0,01	753,0
	12	< 0,01	< 0,01	< 0,01	730,0
	18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	715,0
	24	< 0,01	< 0,01	< 0,01	702,0
Шунгитсодержащие алюмосиликатные сланцы, 1:2	0	250,0	250,0	250,0	2124,0
	3	124,0	124,0	150,0	1379,0
	6	123,5	123,5	170,0	1285,0
	12	135	162,0	162,0	1340,0
	18	142,0	140,0	177,0	1380,0
	24	151,0	151,0	182,0	1406,0
Бentonитовая глина, 1:10	0	250,0	250,0	250,0	2124,0
	3	0,15	0,15	0,15	744,0
	6	< 0,01	< 0,01	< 0,01	679,0
	12	< 0,01	< 0,01	< 0,01	638,0
	18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	638,0
	24	< 0,01	< 0,01	< 0,01	638,0

Таблица 3

*Изменение концентрации ионов в растворе в зависимости от времени сорбции при концентрации металлов в растворе 1000 мг/л*

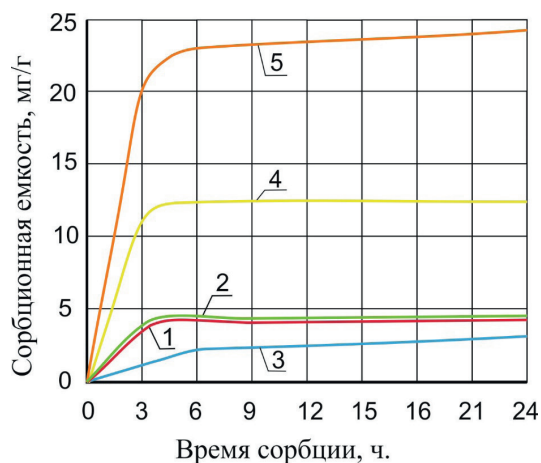
Кесте 3

*1000 мг/л ерітіндідегі металл концентрациясында сорбция уақытына байланысты ерітіндідегі иондар концентрациясының өзгеруі*

Table 3

*Change in the concentration of ions in the solution depending on the sorption time at a metal concentration in the solution of 1000 mg/l*

Вид сорбента, соотношение Т:Ж	Время сорбции, час	Содержание ионов в растворе, мг/л			
		<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	$\Sigma SO_4$
Пиролизированный бурый уголь, 1:2	0	1000,0	1000,0	1000,0	850,0
	3	185,18	106,50	750,0	5900,0
	6	120,61	42,0	515,0	5660,0
	12	106,32	32,1	465,0	5469,0
	18	94,05	22,4	405,0	5638,0
	24	80,41	11,50	340,0	5630,0
Бentonитовая глина, 1:2	0	1000,0	1000,0	1000,0	850,0
	3	330,0	375,0	410,0	5637,0
	6	310,0	345,0	380	5495,0
	12	300,0	330,0	352,0	5440,0
	18	295,0	315,0	343,0	5385,0
	24	290,0	306,0	328,0	5331,80



**Рис. 1. Влияние времени сорбции на суммарную сорбционную емкость природных сорбентов.**

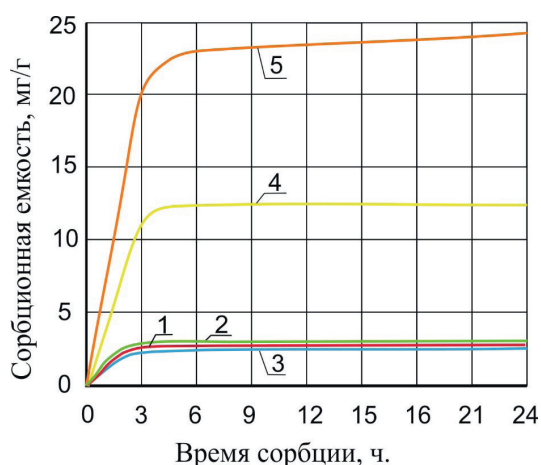
1 – железо; 2 – медь; 3 – цинк; 4 – сульфат-ион;  
5 – суммарная сорбционная емкость.

**Сурет 1. Табиғи сорбенттердің жалпы сорбциялық қабілетіне сорбция уақытының әсері.**

1 – темір; 2 – мыс; 3 – мырыш; 4 – сульфатты ион;  
5 – жалпы сорбциялық сыйымдылық.

**Figure 1. Effect of sorption time on the total sorption capacity of natural sorbents.**

1 – iron; 2 – copper; 3 – zinc; 4 – sulfate ion; 5 – total sorption capacity.



**Рис. 2. Влияние времени сорбции на суммарную сорбционную емкость бентонитовой глины при концентрации металлов в растворах 1000 мг/л.**

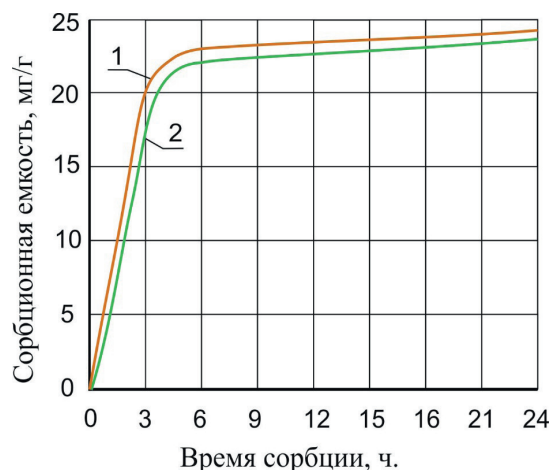
1 – железо; 2 – медь; 3 – цинк; 4 – сульфат-ион;  
5 – суммарная сорбционная емкость.

**Сурет 2. 1000 мг/л ерітінділердегі металл концентрациясында бентонит сазының жалпы сорбциялық қабілетіне сорбция уақытының әсері.**

1 – темір; 2 – мыс; 3 – мырыш; 4 – сульфатты ион;  
5 – жалпы сорбциялық сыйымдылық.

**Figure 2. Effect of sorption time on the total sorption capacity of bentonite clay at a metal concentration in solutions of 1000 mg/l.**

1 – iron; 2 – copper; 3 – zinc; 4 – sulfate ion; 5 – total sorption capacity.



**Рис. 3. Влияние времени сорбции на суммарную сорбционную емкость природных сорбентов.**

1 – бурый уголь, подвергнутый пиролизу;  
2 – бентонитовая глина.

**Сурет 3. Табиғи сорбенттердің жалпы сорбциялық қабілетіне сорбция уақытының әсері.**

1 – пиролизге ұшыраған қоңыр көмір; 2 – бентонит сазы.

**Figure 3. Effect of sorption time on the total sorption capacity of natural sorbents.**

1 – brown coal subjected to pyrolysis; 2 – bentonite clay.

необходимо диспергировать до гранулометрического состава, позволяющего его частицам свободно продвигаться по фильтрационным каналам водоносного пласта.

Сущность реабилитации пластовых вод заключается в поглощении содержащихся в остаточных растворах вредных компонентов природными сорбентами и доведении концентрации этих компонентов до величины ее в пластовых водах до начала техногенного воздействия или до концентрации, равной ПДК для питьевой воды.

Количество природного сорбента, необходимого для очистки 1 л остаточного раствора, можно определить по выражению:

$$q_{n.c.} = \frac{\sum C_{ост.} - \sum C_{пдк.}}{N} z, \quad (3)$$

где  $\sum C_{ост.}$  – суммарная концентрация вредных компонентов в остаточном растворе, мг/л;

$\sum C_{пдк.}$  – суммарная концентрация вредных компонентов согласно ПДК для питьевой воды, мг/л;

$N$  – максимальная сорбционная емкость природного сорбента, мг/г.

Рассмотрим пример. Общая минерализация остаточных растворов достигает после техногенного воздействия 30000 мг/л. Суммарная минерализация природных вод достигает 1000 мг/л. Допустимая общая минерализация по ПДК для питьевой воды также составляет 1000 мг/л.

Таким образом, общее количество вредных компонентов, которые необходимо удалить из остаточных растворов, достигает 29000 мг/л. Чтобы поглотить содержащиеся в остаточных растворах вредные компоненты, в отработанный блок следует ввести необходимое количество сорбента.

Как показано выше, сорбционная емкость по сумме компонентов достигает 24,13 мг/л для бентонитовой глины и 24,16 мг/л для бурого угля, подвергнутого пиролизу.

Для поглощения содержащихся в 1 л остаточного раствора 29000 мг вредных компонентов необходимо ввести 1208,3 г сорбента.

При величине удельного веса бентонитовой глины 2,0–2,2 объем сорбента на 1 литр остаточного раствора составит 0,5–0,6 см. Следовательно, 40–50% порового пространства пласта останется свободными для фильтрации пластовых вод.

Результаты исследований, приведенные в таблице 2, подтвердили наши предположения. Как видно из таблицы, степень очистки воды от ионов тяжелых металлов достигает 95% [9–10]. Взаимодействия ионов-примесей с гуматом натрия приведены в таблице 4.

Таблица 4

**Кинетика процесса взаимодействия ионов-примесей с гуматом натрия**

Кесте 4

**Қоспа иондарының натрий гуматымен әрекеттесу процесінің кинетикасы**

Table 4

**Kinetics of the interaction process of impurity ions with sodium humate**

Продолжительность контакта, мин.	Концентрация примесей в воде, мг/л		Степень очистки воды, % от тяжелых металлов
	Cu	Zn	
0	5,2	6,5	-
10	2,75	3,4	47,0
20	1,87	2,34	63,5
30	0,64	0,79	87,7
60	0,37	0,45	92,8
90	0,33	0,3	95,5

Из представленных в таблице данных следует, что гумат-натрия может быть использован для очистки воды от ионов тяжелых металлов. Склонность к анионному обмену и снижению pH растворов не проявляет. Преимущество перед исследованными сорбентами гумата-натрия заключается в том, что этот реагент не требует специальной подготовки, а именно измельчения активации.

Определение количества вредных компонентов в остаточных растворах и количества природных сорбентов, необходимого для деминерализации пластовых вод и анализ полученных результатов приводят к следующим выводам и рекомендациям:

- гранулометрический состав любого сорбента не должен превышать пределов 100–25 мкм, что обуславливается размером каналов фильтрации подстилающих пород;

- поскольку за счет механоактивации повышается реакционная и сорбционная способность, то количество сорбента может быть значительно снижено. При этом снижается вязкость суспензии, облегчается процесс продвижения их по магистрали к насосу и далее в пласт.

Учитывая вышесказанное, при подготовке природных сорбентов к введению в пласт в виде суспензии нами исследован процесс измельчения и определена зависимость гранулометрического состава от времени измельчения; проведен подбор оптимального соотношения Т:Ж для получения устойчивой суспензии; исследована активность измельченного сорбента.

Проведенные исследования по очистке от тяжелых металлов показал, что природные материалы, такие как бентонитовая глина и бурый уголь могут быть применены для очистки пластовых вод после завершения добычи урана способом ПСВ.

### Заключение

Перспективным способом реабилитации остаточных растворов после подземного скважинного выщелачивания является использование природных сорбентов, вводимых в зону распространения остаточных растворов.

Из исследованных природных сорбентов для очистки остаточных растворов после ПСВ наиболее пригодны бурый уголь, подвергнутый пиролизу и бентонитовая глина. По суммарной сорбционной емкости они практически равноценны (24,13–24,16 мг/г).

### Выводы

1. Исследованы сорбционные свойства ранее не исследованных органоминеральных пород месторождений Казахстана, бурых углей, бентонитовых глин, сланцевых углеродосодержащих алюмосиликатов.

2. Оценены химические и сорбционные свойства окисленного бурого угля месторождения Киякты, который склонен к сорбции тяжелых металлов, но не очищает воду от сульфат-ионов, что объясняется его химическим составом.

3. Бентонитовая глина месторождения Шукуррой обладает высокими сорбционными свойствами как по отношению к катионам, так и к анионам и обеспечивает очистку воды от примесей до 95%.

4. Оценены сорбционные свойства сланцевых углеродосодержащих алюмосиликатов. Установлено, что сорбционная емкость этого сорбента не велика и обеспечивает степень очистки воды до 40–70%.

5. Исследованы условия активации ископаемого угля. Установлено, при термообработке угля при температуре 500–600 °C его активность увеличивается, что позволяет очистить воду от примесей до 98–99 %, в том числе и от сульфат-ионов.

6. Установлено, что гумат натрия, выделенный из бурого угля, проявляет высокую химическую активность, вступает в реакции с ионами тяжелых металлов, образует прочные комплексные металлоорганические соединения. Образование коагулянтов с анионами-примесями приводит к снижению концентрации их в воде и степень очистки достигает до 100%.

Выполненные эксперименты позволяют сделать вывод, что наиболее эффективными природными сорбентами из исследованных являются бурый уголь, подвергнутый пиролизу, и бентонитовая глина, а бурый уголь в природном виде не поглощает сульфат-ион, а шунгитсодержащие алюмосиликатные сланцы имеют низкую сорбционную способность.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Нуркеев С.С., Мусина У.Ш. Экология: Алматы, 2005. 489 с. (на русском языке)
2. Жалгасулы Н. Экологическое воздействие горно-обогатительных предприятий Казахстана на окружающую природную среду // Геология и разведка недр Казахстана. 1999. № 1. С. 59–68 (на русском языке)
3. Подземное выщелачивание полиэлементных руд. Под ред. Н.П. Лаверова. М.: Академия горных наук, 1998. 446 с. (на русском языке)
4. Косиченко Ю.М., Сильченко В.Ф. Технологии удаления сероводорода в процессе обработки подземных вод // Экология и водное хозяйство. 2020. № 1 (04). С. 43–59 (на русском языке)
5. Очистка сточных вод нефтегазовой отрасли: современные практики и перспектив / Сунита Варьяни [и др.] // Устойчивые промышленные и экологические биопроцессы. 2020. Т. 27. С. 27172–27180 (на английском языке)
6. Мелидис Р. Удаление фтора из сточных вод алюминиевой отделки с помощью гидроксипатита // Environ Process. 2015. Т. 2. С. 205–213 (на английском языке)
7. Забазнов В.Л. Всесторонняя оценка и сравнение сернокислотного и карбонатного ПВ // Тезисы докл. II международной конференции по актуальным проблемам урановой промышленности, Алматы, 2002. С. 238 (на русском языке)
8. Садуақасова А.Т. Сорбционная технология извлечения урана из техногенного и гидроминерального сырья с применением природных модифицированных сорбентов: дисс. на соиск. степени докт. филос., Усть-Каменогорск, 2017. 161 с. (на русском языке)
9. Жалгасулы Н. Исследование свойств природных сорбентов для очистки пластовых вод // Наука и новые технологии. 2013. № 5. С. 68–70 (на русском языке)
10. Переработка угля с низкой степенью метаморфизма / Жалгасулы Н. [и др.] // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2 (60). С. 453–469 (на английском языке)

**ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1. Нуркеев С.С., Мусина У.Ш. Экология: Алматы, 2005. 489 б. (орыс тілінде)
2. Жалгасулы Н. Қазақстанның тау-кен байыту кәсіпорындарының қоршаған ортаға экологиялық әсері // Қазақстанның минералдық ресурстарының геологиясы және барлауы. 1999. № 1. Б. 59–68 (орыс тілінде)
3. Полиэлементтік кендерді жерасты шаймалау. Өңдеген Н.П. Лаверов. М.: Тау-кен ғылымдары академиясы, 1998. 446 б. (орыс тілінде)
4. Косиченко Ю.М., Сильченко В.Ф. Жер асты суларын тазарту кезінде күкіртсутекті жою технологиялары // Экология және су шаруашылығы. 2020. № 1 (04). Б. 43–59 (орыс тілінде)
5. Мұнай мен газдың ағынды суларын тазарту: ағымдағы тәжірибелер мен перспективалар / Сунита Варьяни [және т. б.] // Тұрақты өнеркәсіптік және экологиялық биопроцестер. 2020. Т. 27. Б. 27172–27180 (ағылшын тілінде)
6. Melidis R. Гидроксипатит көмегімен алюминийден жасалған ағынды сулардан фторидтерді жою // Environ Process. 2015. Т. 2. Б. 205–213 (ағылшын тілінде)
7. Забазнов В.Л. Күкірт қышқылы мен карбонатты ПВ кешенді бағалау және салыстыру. Уран өнеркәсібінің өзекті мәселелері бойынша II Халықаралық конференция баяндамасының тезистері, Алматы, 2002. Б. 238 (орыс тілінде)
8. Садуақасова А.Т. Табиғи модификацияланған сорбенттерді қолдану арқылы техногендік және гидроминералды шикізаттан уран алудың сорбциялық технологиясы: дисс. философия докторы дәрежесін алу үшін, Өскемен, 2017. 161 б. (орыс тілінде)
9. Жалгасулы Н. Қабат суларын тазартуға арналған табиғи сорбенттердің қасиеттерін зерттеу // Ғылым және жаңа технологиялар. 2013. № 5. Б. 68–70 (орыс тілінде)
10. Метаморфизмнің төмен дәрежесі бар көмірді өңдеу / Жалгасулы Н. [және т. б.] // Таулы аумақтардың тұрақты дамуы. 2024. Т. 16. № 2 (60). Б. 453–469 (ағылшын тілінде)

**REFERENCES**

1. Nurkeev S.S., Musina U.Sh. Ekologiya [Ecology]: Almaty, 2005. 489 p. (in Russian)
2. Zhalgasuly N. Ekologicheskoe vozdeistvie gorno-obogatitel'nykh predpriyatii Kazakhstana na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu [Ecological impact of mining and processing enterprises of Kazakhstan on the environment], Geologiya i razvedka neдр Kazakhstana [Geology and exploration of mineral resources of Kazakhstan]. 1999. No. 1. 59–68 pp. (in Russian)
3. Podzemnoe vyshchelachivanie polielementnykh rud. Pod red. N.P. Laverova [Underground leaching of polyelement ores. Edited by N.P. Laverov]. Moscow: Akademiya gornyykh nauk, 1998. 446 p. (in Russian)

4. Kosichenko Yu.M., Silchenko V.F. *Tekhnologii udaleniya serovodoroda v protsesse obrabotki podzemnykh vod [Technologies for removing hydrogen sulfide during groundwater treatment], Ekologiya i vodnoe khozyaistvo [Ecology and water management]. 2020. No. 1 (04). 43–59 pp. (in Russian)*
5. *Oil and Gas Wastewater Treatment: Current Practices and Prospects / Sunita Waryani [et al.] // Sustainable Industrial and Environmental Bioprocesses. 2020. V. 27. 27172–27180 pp. (in English)*
6. Melidis P. *Fluoride removal from aluminium finishing wastewater by hydroxyapatite // Environ Process. 2015. V. 2. 205–213 pp. (in English)*
7. Zabaznov V.L. *Vsestoronnyaya otsenka i sravnenie sernokislотного i karbonatного PV [Comprehensive assessment and comparison of sulfuric acid and carbonate PV], Tezisy dokl. II medunarodnoi konferentsii po aktual'nyim problemam uranovoi promyshlennosti [Abstracts of the report. II International Conference on Actual Problems of the Uranium Industry], Almaty, 2002. 238 p. (in Russian)*
8. Saduakasova A.T. *Sorbtsionnaya tekhnologiya izvlecheniya urana iz tekhnogenного i gidromineral'nogo syr'ya s primeneniem prirodnykh modifitsirovannykh sorbentov: diss. na soisk. stepeni dokt. filos. [Sorption technology for extracting uranium from technogenic and hydromineral raw materials using natural modified sorbents, diss. for the degree of Doctor of Philosophy], Ust-Kamenogorsk, 2017. 161 p. (in Russian)*
9. Zhalgasuly N. *Issledovanie svoystv prirodnykh sorbentov dlya ochistki plastovykh vod [Study of the properties of natural sorbents for purification of formation waters], Nauka i novye tekhnologii [Science and new technologies]. 2013. No. 5. 68–70 pp. (in Russian)*
10. *Coal processing with a low degree of metamorphism / Zhalgasuly N. [et al.] // Sustainable Development of Mountain Territories. 2024. V. 16. No. 2 (60). 453–469 pp. (in English)*

#### Сведения о авторах:

**Жалгасулы Н.**, д.т.н., зав. отделом «Экология и безопасность горных работ», профессор, академик Международной академии «Экология», Институт горного дела им. Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан), [zhalgasuly39@mail.ru](mailto:zhalgasuly39@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7550-9782>  
**Исмаилова А.А.**, Ph.D, зав. лаб. «Экология и рациональное освоение недр», СНС, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан), [ismailova@inbox.ru](mailto:ismailova@inbox.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5705-3363>  
**Уайсулы Н.**, инженер, начальник станции, Алматинский метрополитен (г. Алматы, Казахстан), [nurasil87@mail.ru](mailto:nurasil87@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0001-1978-3821>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Жалгасулы Н.Ж.**, Д.А. Қонаев атындағы Кен істері институтының «Кен істер қауіпсіздігі мен экология» бөлімінің меңгерушісі, т.ғ. д., проф. (Алматы қ., Қазақстан)  
**Исмаилова А.А.**, Ph.D, зертхана меңгерушісі «Экология және жер қойнауын ұтымды дамыту», ҒКК, Д.А. Қонаев атындағы тау-кен институты (Алматы қ., Қазақстан)  
**Уайсулы Н.**, Алматы метросы, инженер, станция бастығы (Алматы қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Zhalgasuly N.Zh.**, Professor, Head of the Department «Ecology and Safety of Mining» of the D.A. Kunaev Institute of Mining, Doctor of Technical Sciences (Almaty, Kazakhstan)  
**Ismailova A.A.**, Ph.D, Head of the Lab. «Ecology and Rational Development of Subsoil», SSC, D.A. Kunaev Mining Institute (Almaty, Kazakhstan)  
**Uaysuly N.**, Almaty metro, engineer, station manager (Almaty, Kazakhstan)