



СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БРУСИТА И ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

В.А. Королёв, Е.Н. Самарин, В.А. Панфилов, И.В. Романова

**МГУ им. М.В. Ломоносова,
ООО "Мировые Экологические Стандарты"**

Рассмотрены уникальные сорбционные свойства природного минерала – брусита Кульдурского месторождения, а также смесей с различными глинами, приготовленных на его основе. Показано, что из брусита и его смесей могут изготавливаться различные сорбционные материалы, обладающие высокой эффективностью поглощения по отношению к тяжелым металлам, прежде всего к меди. Эти сорбенты могут успешно использоваться для создания барьерных технологий и решения различных экологических задач, связанных с защитой окружающей среды от тяжелых металлов, очисткой сточных вод и т.п.

Ключевые слова: брусит, глины, тяжелые металлы, медь, сорбция, поглощение, барьерные технологии, экологические задачи

Sorption Properties of Brucite and Brucite-Based Clay Mixtures and Their Use in Barrier Technologies

V.A. Korolev, E.N. Samarin, V.A. Panfilov, I.V. Romanova

**Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119899 Russia,
ООО "Miroviye Ecologicheskiye Standarty", Moscow, 119048 Russia**

We considered unique adsorption properties of a natural mineral – brucite from Kuldur minefield as well as brucite-based mixtures with different clays. It was shown that brucite and brucite-based mixtures allow production of different sorption materials possessing high absorption efficiency in relation to heavy metals and first of all to cuprum. These sorbents can be successfully used for creation of barrier technologies and solving of different environmental problems related to environmental protection from heavy metals, waste water treatment, etc.

Key words: brucite, clays, heavy metals, cuprum, adsorption, absorption, barrier technologies, environmental problems

DOI: 10.18412/1816-0395-2016-1-18-24

Барьерные технологии, представляющие собой комплекс защитных мероприятий и сооружений, создаваемых на пути миграции различных токсикантов (радионуклидов, тяжелых металлов и т.п.), играют все большую роль в решении экологических проблем, связанных с загрязнением геологической среды. При этом создаваемые защитные экраны работают по принципу различных геохимических барьеров, которые могут быть полупроницаемыми (селективными) или непроницаемыми. Важную роль в этих технологиях играют сорбционные барьеры, создаваемые на основе различных сорбентов.

Среди природных сорбентов в барьерных технологиях традиционно применяют высокодисперсные глины смектитового состава. Наряду с этим могут использоваться и не глинистые минералы, в частности брусит

($Mg(OH)_2$), минерал, относящийся к классу гидроксидов. Поглощающая способность брусита по отношению к тяжелым металлам (ТМ) аномально высока и по разным данным составляет от 900 до 1400 мг/г [1 – 3]. Она намного (в десятки раз) превышает сорбционную ёмкость монтмориллонитовых глин (достигающую не более 450 мг/г) и тем более каолинитовых глин. Сорбционная способность брусита по извлечению ТМ из различных растворов, включая поликомпонентные сточные воды, неодинакова и увеличивается в ряду: $Mn < Ni < Co < Cd < Zn < Cu$ [3, 4]. Другие авторы приводят для брусита следующий ряд поглощения металлов: $Co < Ni < Zn < Al < Cu$ [5].

Поэтому не удивительно, что к настоящему времени выполнено значительное число исследований по изучению сорбции бруситом ТМ из рас-

твора [3, 5 – 8], а также его применению как щелочного барьера [9, 10] или сорбента для органических токсикантов [11] и радионуклидов [12]. Однако многие особенности брусита, важные для решения экологических проблем, остаются еще слабо изученными. В связи с этим целью настоящей статьи является оценка сорбционных свойств брусита и глинистых смесей на его основе по отношению к ТМ с возможным применением этих сорбентов для решения экологических проблем.

Объекты исследования

В настоящей работе изучался брусит Кульдурского месторождения, которое является единственным в России эксплуатируемым месторождением брусита. Оно находится в Хабаровском крае в 14 км к северу от ж/д станции Известковая. Куль-

дурское месторождение является гидротермально-метасоматическим [13].

Наряду с бруситом (марки БРКМ) в лабораторных экспериментах нами исследованы его смеси с огнеупорными глинами, отличающимися низкой физико-химической активностью, с целью их утилизации и возможного вторичного использования в качестве сорбентов: образец № 1 — природная огнеупорная глина Аркалыкского месторождения (Кустанайская обл., Казахстан) и образец № 2 — смесь из пыли, образующейся при обжиге шихты огнеупорной глины Рудника Полдней (Свердловская обл.), и глины Увелковского месторождения (Челябинская обл.).

Из природного брусита (образец № 3) и указанных глин были изготовлены смеси в соотношении 1:1 (по массе) — образцы № 8 и 13 (табл. 1), которые затем были подвергнуты температурной модификации при 600 °С в течение часа — образцы № 18 и 23. Кроме порошкообразных образцов изучались гранулированные образцы, приготовленные из указанных смесей как лабораторным способом (1-я серия: образцы № 18г, 23г, 24г), так и в заводских условиях (2-я серия: образцы № 25г, 26г, 29г) (см. табл. 1).

Химико-минеральный состав исследуемых сорбентов изучался с помощью комплекса методов: 1) рентгеновского на дифрактометре Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония); 2) термического анализа на дериватографе Q 1500D; 3) рентгенофлуоресцентного анализа на приборе СПЕКТРОСКАН-МАХ.GV.

Глина Аркалыкского месторождения (образец № 1) при высоком содержании каолинита (81 %) имеет большое количество примесных минералов (табл. 2). Состав глины Увелковского месторождения (образец № 2) сформирован 4 минералами при преобладании каолинита (53 %). Образец № 3 (Кульдурское месторождение) содержит брусит (61 %), частично карбонизированный (магнезит 28 %), и незначительное количество кальцита, доломита и кварца (в сумме — до 10 %). Валовый минеральный состав исследуемых исходных образцов глин приведен в табл. 2.

Таблица 1. Характеристика исследуемых образцов глин и брусита

№ образца	Характеристика	Температура обжига, °С	Состояние
1	Глина каолиновая Аркалыкского месторождения	–	Порошок светло-серый
2	Глина иллит-каолиновая Рудника Полдней и Увелковского месторождения (смесь)	–	То же
3	Брусит (марки БРКМ)	–	–
8	Смесь № 1 и № 3	–	–
13	Смесь № 2 и № 3	–	–
Термически обработанные смеси:			
18	№ 1 и № 3	600	Порошок светло-серо-розовый
23	№ 2 и № 3	600	Порошок светло-серый
Гранулированные смеси:			
24г	№ 2 и № 3	600	Гранулы темно-серые
18г	№ 1 и № 3	600	Гранулы серо-розовые
23г	№ 2 и № 3	600	Гранулы серые
25г	Гранулированная смесь с последующим обжигом № 2 и № 3	780	Гранулы серо-розовые
26г	То же	600	То же
29г	То же	750	То же

Примечание. Состав смеси, % – 50 + 50.

Валовой химический состав исходных образцов соответствует их минеральному составу (табл. 3).

Термический анализ изученных образцов позволил выявить ряд эффектов в диапазоне температур от 0 до 1000 °С (рис. 1).

Как следует из термограмм глины Аркалыкского месторождения (рис. 1, а), на кривой ДТА помимо основного эндотермиче-

ского пика в диапазоне температур 550 — 680 °С, обусловленного дегидроксилизацией каолинита, фиксируется незначительный эндотермический эффект с максимумом при температуре 300 °С, характерный для гидрогетита (содержание не превышает 2,6 %). Для образца глины из Увелковского месторождения (образец № 2) харак-

Таблица 2. Минеральный состав исходных образцов глин, %

№ образца	Кварц	Иллит	Каолинит	Бемит	Гиббсит	Гематит	Мулит	Брусит
1	0,8	6,5	80,6	1,5	3,2	1,6	5,8	–
2	25,9	15,2	53	0	0,5	–	5,4	–
3*	4,0	–	–	–	–	–	–	61
8	0,5	3,25	40,3	0,75	1,6	0,8	2,9	48
13	13,05	7,6	26,5	0	0,25	0	2,7	48

*Образец № 3 кроме кварца и брусита содержит 28 % магнезита, 3 % кальцита и 4 % доломита.

Таблица 3. Химический состав исходных образцов глин, %

№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
1	49,44	1,87	33,08	0,72	–	0,87	0,43	0,64	0,24	0,6	13,76
2	61,16	0,96	25,37	1,72	0,01	0,23	0,07	0,84	1,38	0,18	7,97
3	3,38	0,06	0,87	0,13	–	2,75	58,52	0,39	–	–	35,68

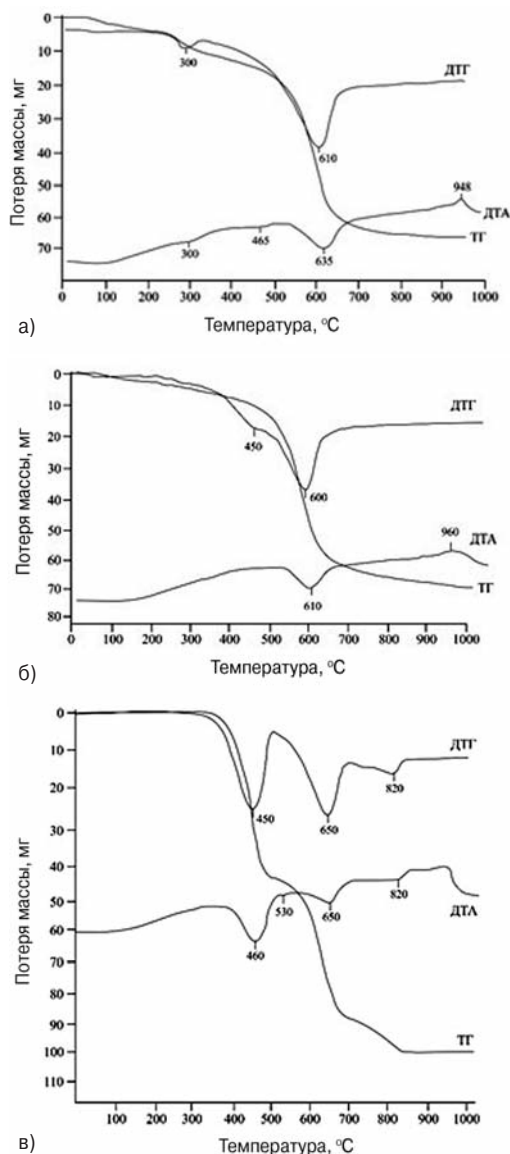


Рис. 1. Термограммы исходных образцов:
 а – № 1 (глина Аркалыкского месторождения);
 б – № 2 (глина Увелковского месторождения);
 в – № 3 (брусит Кульдурского месторождения);
 ДТГ – кривая скорости потери массы; ДТА – кривая дифференциально-термического анализа;
 ТГ – термогравиметрическая кривая

терно сдвигение основного эндотермического пика в малотемпературную область благодаря существенной примеси иллита (рис. 1, б) и небольшой эндотермический эффект с максимумом при 450 °С на кривой ДТГ, который, вероятно, обусловлен незначительной (до 1,6 %) примесью бемита. Для образца из Кульдурского месторождения (рис. 1, в) на кривой ДТА фиксируются эндотермические пики

с максимумами при 460, 650 и 820 °С, обусловленные присутствием в составе брусита, магнезита и доломита. Потеря массы для исследованных образцов составляет 9,31; 7,60 и 38,5 % соответственно, плотность твердой фазы брусита – 2,4 – 2,44 г/см³, насыпная плотность – 1,40 – 1,45 г/см³.

Для оценки кислотно-основной буферности (КОБ) исходных образцов было выполнено потенциометрическое титрование 1 %-ных суспензий глин в 0,01 н растворе NaNO₃ добавлением 0,0569 н HCl по 1 мл через каждые 3 мин. Результаты представлены в виде гистограмм интенсивности КОБ β, мг-экв/г, в функции от pH (рис. 2).

Суммарная величина КОБ образцов № 1 и № 2 составляет 0,07 и 0,04 мг-экв/г (см. рис. 2, а, б) и определяется преимущественно медленным (скорость нейтрализации кислоты не превышает 0,13 – 0,15 мг-экв/г в сутки при pH 3 – 4) растворением глинистых минералов. На гистограмме интенсивности КОБ брусита (рис. 2, в) фиксируются два протяженных буферных интервала: первый в диапазоне pH = 8,7 ÷ 10,1, обусловленный растворением брусита, и второй в диапазоне pH = 4,9 ÷ 8,4, определяемый растворением магнезита и доломита. При этом необходимо отметить, что если карбонаты реагируют с кислотой практически полностью – приблизительно 28,5 % массы образца, то количество растворившегося брусита не превышает 1/3 от исходного количества, что, видимо, объясняется разной дисперсностью частиц. Суммарная величина КОБ брусита составляет 4,32 мг-экв/г, что свидетельствует о его колоссальной способности к нейтрализации кислых растворов.

Как известно [14], температура разложения брусита по реакции Mg(OH)₂ → MgO + H₂O составляет 450 – 500 °С. Разложение брусита сопровождается эндотермическими эффектами при температурах 470 и 740 °С. Первый эффект соответствует разложению Mg(OH)₂, второй – разложению небольшого количества примесного доломита. При нагревании (обжиге) до 700 – 1000 °С магнезит теряет большую часть углекислоты и превращается в порошкообразную массу

(каустический или малообожженный магнезит), характеризующуюся щелочными свойствами. Содержание CO₂ в нем не превышает 3 – 8 %. В интервале температур от 350 до 700 °С обжиг брусита способствует образованию оксида магния, а при температуре 1000 °С и выше образуется периклаз. Это хорошо видно по изменению минерального состава термически обработанных смесей (табл. 4).

Таким образом, при прокаливании при 600 °С у брусита увеличивается гидравлическая активность, что позволяет использовать его как вяжущее [15].

Методика исследования сорбции тяжелых металлов

Адсорбция изучаемыми глинами ТМ определялась нами по общепринятой методике оценки сорбционной ёмкости из раствора [16]. Навеска воздушно-сухого грунта (5 – 10 г) в пересчете на абсолютно-сухую массу обрабатывалась определенным объемом изучаемого раствора требуемой концентрации (например, 1 н раствором соли данного ТМ) в соотношении твердой и жидкой фазы 1:10 (для более полного прохождения сорбционного процесса). Поскольку в различных работах [1 – 3] было установлено, что из всех ТМ медь наиболее сильно адсорбируется бруситом, то в первую очередь нами были проведены опыты с растворами меди. Для этого использовался водный раствор пятиводного медного купороса CuSO₄·5H₂O при концентрации 100 г/л (pH = 3,07). Суспензия изучаемой глины или брусита перемешивалась в закрытой колбе, а затем выдерживалась в закрытом цилиндре в течение суток. Поскольку из ТМ, плохо адсорбирующихся бруситом, отмечены марганец и никель [3], то в наших опытах также использовались водные растворы сульфатов марганца и никеля, имеющие слабо розовую и слабо зеленую окраски, что позволяло для определения их концентрации применять колориметрический метод.

Затем в исходном и прореагировавшем с адсорбентом растворе определялась концентрация изучаемого ТМ с помощью фотоколориметра-люминометра типа "УНИФОТ-ЛЮМ 8С-420". Кроме

того, поглощение меди бруситом и смесями на его основе изучалось с помощью спектрофотометра на приборе СПЕКТРОСКАН в соответствии с МВИ №2420/69-2004, разработанной ООО НПО "Спектрон", регламентированной в М049-П/04 (Санкт-Петербург, 2004) и аттестованной в соответствии с ГОСТ Р.8.563-96. При этом получали серии данных по содержанию меди в исходном образце и образце после сорбции меди. В последнем случае образец предварительно отмывался от избытка свободной меди декантацией. По разности содержания меди в исходном и конечном образце рассчитывалась величина его сорбционной ёмкости по отношению к меди.

Известно, что сорбционные свойства глин существенно зависят от кислотно-основных особенностей их поверхности в растворах. Для исследования кислотно-основных свойств смесей и влияния рН растворов, взаимодействующих с бруситом-глинистыми смесями, также проводились исследования точки нулевого заряда (изоэлектрической точки) изучаемых образцов методом потенциометрического титрования с помощью прибора рН-150М с измерительным электродом ЭСЛ 45-11 и электродом сравнения ЭВЛ-1М4 при крутизне электродной функции 58,4.

Результаты исследования и их анализ

Процесс сорбции на брусите рассматривается как гетерогенный, состоящий из двух стадий: доставки иона металла из раствора к поверхности сорбента и взаимодействия иона с этой поверхностью. Каждая из этих стадий может быть лимитирующей, т.е. оказывать максимальное влияние на скорость процесса. Доставка иона металла к границе между фазами может осуществляться за счет конвекции и диффузии. Сорбция происходит преимущественно на поверхности минерала с образованием объемных аква- и гидрокомплексов с ОН-группами. Присутствует также сорбция по ионообменному механизму с замещением ионов Mg^{2+} на ионы сорбированного металла, что подтверждается появлением магния в растворе в количестве, большем,

чем величина растворимости брусита.

Поглощение бруситом ионов ТМ, возможно, обусловлено протеканием одновременно процессов ионообменной адсорбции и хемосорбции, характеризующихся:

- замещением в структуре брусита ионов магния на катионы извлекаемых металлов;
- разрывом химических связей на поверхности минерала и появлением на ней гидроксильных групп, водород которых при определенных условиях может вступать в реакцию обмена;
- образованием на поверхности брусита аква- и гидроксокомплексов посредством присоединения ионов металлов к свободным или ионизированным ОН-группам.

Кроме того, брусит имеет свойство подщелачивать воду в результате слабого растворения (не более 1 мг-экв/л) в зависимости от рН среды. Он легко растворяется в кислотах и помимо специфических сорбционных свойств используется для нейтрализации кислых сточных вод.

В ходе вышеописанных исследований нами были определены значения сорбции различных тяжелых металлов (занимающих крайние положения в ряду $Mn - Ni - Co - Cd - Zn - Cu$) на анализируемых глинах (образцы № 1 и № 2) и природном брусите (образец № 3). Результаты этих исследований представлены в табл. 5.

Как видно из представленных данных, образцы глин № 1 и № 2 характеризуются очень низ-

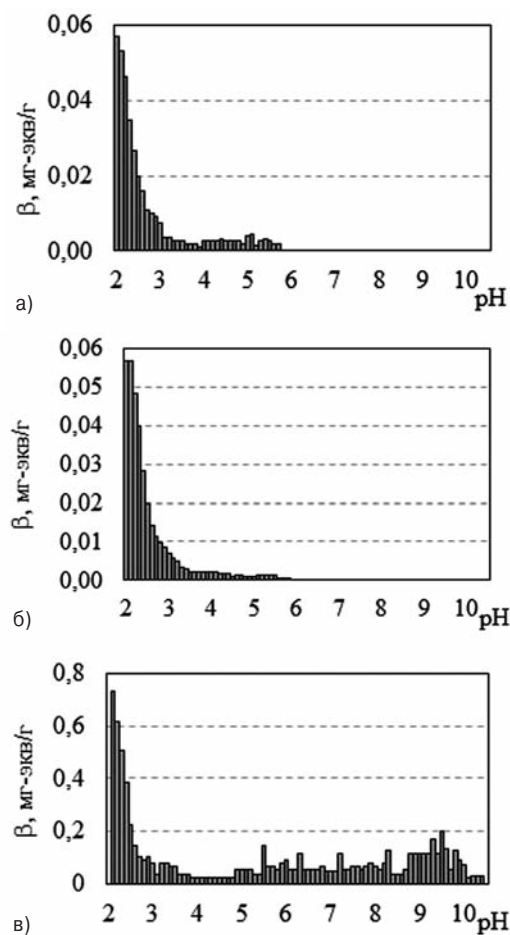


Рис. 2. Гистограммы интенсивности КОБ образцов: а – № 1; б – № 2; в – № 3

кой сорбционной способностью по отношению к ионам Mn , Ni и Cu , что объясняется их каолиновым составом и, соответственно, низкой ёмкостью поглоще-

Таблица 4. Минеральный состав термически обработанных образцов глин, %

Минерал	№ 18	№ 23	№ 24
Каолинит (аморфизованный)	89,3	86,7	15,3
Брусит	6,2	6,8	4,1
Муллит	1,1	1,2	12,8
Доломит	1,0	0,6	0,0
Кварц	0,4	3,0	9,0
Анастаз	0,3	0,4	1,7
Альбит	0,6	0,5	0,6
Периклаз	1,0	-	41,0
Бёмит	-	-	0,4
Иллит	-	0,7	15,2

Таблица 5. Сорбционная ёмкость исследуемых образцов по отношению к различным ТМ, мг/г

№ образца	Cu	Cu*	Ni	Mn
1	0,023	0,58	0,01	п.о.
2	0,031	0,89	0,01	п.о.
3	189	171,4	2,8	0,3
8	6,2	8,7	1,5	0,01
13	13,2	19,2	2,4	0,02
18	278	267,8	4,6	0,56
19	-	5,28	-	-
23	240	216,6	5,7	0,32

Примечание. п.о. – предел обнаружения.
*Определение методом спектроскопии.

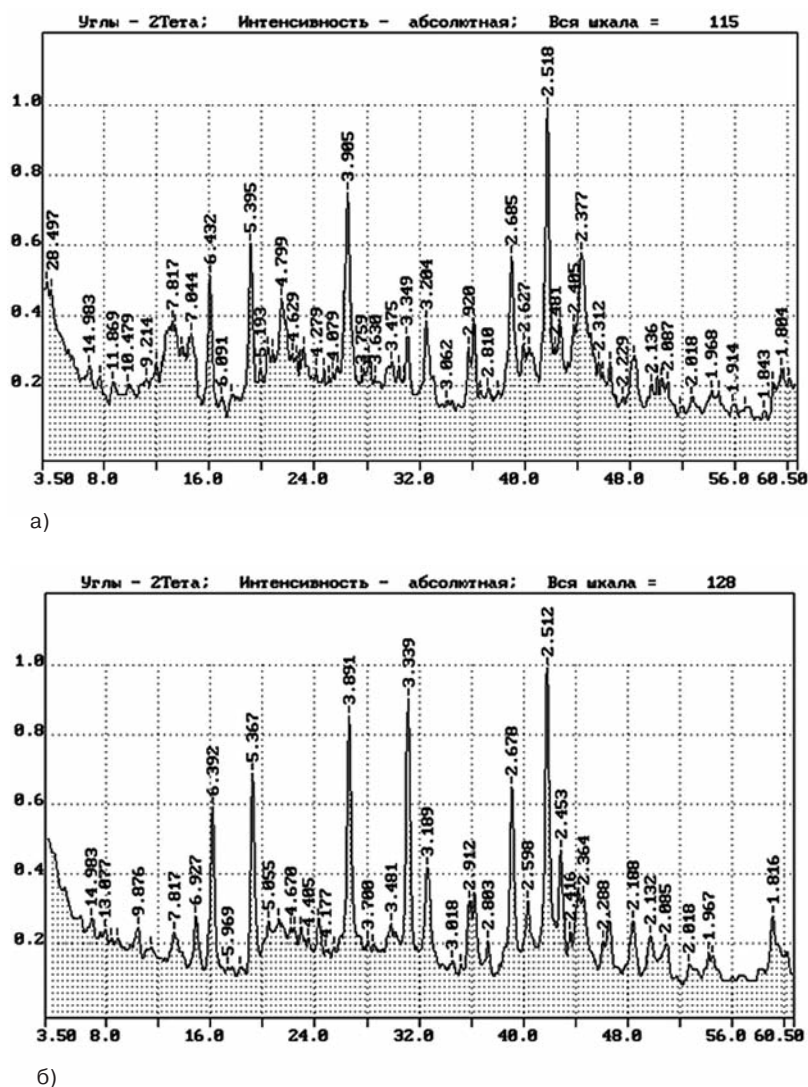


Рис. 3. Дифрактограмма образца № 18 (а) и № 23 (б) после взаимодействия с раствором сульфата меди

ния и катионного обмена (см. выше). В то же время, природный брусит (образец № 3) обладает довольно высокой способностью поглощать ТМ, особенно медь (см. табл. 5). В соответствии с этим смеси анализируемых глин и природного брусита также проявляют более высокую сорбционную способность, чем "чистые" глины. Из табл. 5 следует, что сорбционная способность смесей анализируемых глин с бруситом (в соотношении 1:1 по массе, образцы № 8 и № 13) увеличивается в сотни раз благодаря его активности. При этом, естественно, чем больше в смеси массовая доля брусита, тем больше сорбционная ёмкость смеси. Задавая различное массовое соотношение смесей,

можно таким образом регулировать величину их сорбционной ёмкости по отношению к ТМ.

Результаты экспериментального определения сорбционной ёмкости термически модифицированных смесей анализируемых глин с бруситом (образцы № 18 и 23) также приведены в табл. 5. Из полученных данных следует, что они вполне согласуются с имеющимися опубликованными результатами других авторов [17] о том, что термически модифицированный брусит имеет более высокую сорбционную ёмкость вследствие "разрыхления" его кристаллической структуры при обжиге. По сравнению с природным бруситом сорбционная ёмкость смесей на его основе возрастает в десятки раз (см. табл. 5).

Существенное значение при взаимодействии с растворами кислых солей имеет также величина кислотно-основной буферности адсорбентов. Изучение минерального состава образцов № 18 и № 23 после сорбции меди показало, что удаление ионов металла из раствора происходит также и вследствие прямого осаждения в виде сульфогидроксидов при щелочной нейтрализации (рис. 3). На рентгеновских дифрактограммах образцов отчетливо выделяются серии рефлексов с межплоскостными расстояниями 3,89; 2,52; 2,68; 6,39; 5,35; 3,19; 2,91; 2,60; 5,05; 2,46 Å, характерные для брошантита — Cu₄(OH)₆[SO₄].

Кроме того, данные табл. 5 подтверждают факт большей сорбционной ёмкости брусита по отношению к меди, чем к никелю или марганцу.

Как известно, природные сорбенты весьма широко используются для решения различных экологических задач, в частности для очистки от загрязненной воды, промышленных стоков, создания защитных барьеров на пути фильтрации загрязнителей и т.п. ТМ составляют значительную долю среди техногенных загрязнителей окружающей (в том числе геологической) среды, поэтому разработка эффективных способов защиты от них или очистки загрязненных компонентов геологической среды представляет актуальную проблему. Её решение возможно с использованием рассмотренных выше природных сорбентов на основе брусита.

Высокая сорбционная способность брусита и глинистых смесей на его основе позволяет решать двоякую задачу: 1) утилизировать неактивные глины, 2) создавать на его основе высокоэффективные сорбенты. Область применения указанных сорбентов довольно широка: они могут применяться в системах водоочистки, для очистки промышленных стоков, для очистки гальванических стоков металлургических предприятий, для создания защитных сорбционных экранов (барьерных технологий), используемых для локализации очагов загрязнений и т.п.

Оценка кислотно-основных свойств изучаемых смесей про-

водилась при определении точки нулевого солевого заряда (или изоэлектрической точки, $pH_{изт}$) по общепринятой методике [18]. Результаты исследований представлены на рис. 4 и в табл. 6. При значениях pH меньше точки нулевого заряда ($pH_{изт}$) поверхность глинистых и других минеральных частиц заряжена положительно и, следовательно, способна сорбировать лишь анионы; при значениях pH , превышающих изоэлектрическую точку, напротив, поверхность глинистых частиц заряжается отрицательно и, следовательно, способна сорбировать катионы. Анализ результатов определения $pH_{изт}$ показывает, что в области pH , близкой к нейтральной, сорбционная способность смесей по отношению к тяжелым металлам и положительно-заряженным ионным комплексам будет незначительной, а в кислой среде (при $pH < pH_{изт}$) — вообще будет отсутствовать. В щелочной же среде (т.е. при $pH > pH_{изт}$) сорбционная способность брусита и брусито-глинистых смесей будет повышаться. Следовательно, наиболее эффективно рассматриваемые смеси и гранулированные образцы на их основе как сорбенты будут работать именно в щелочной среде.

Значения изоэлектрической точки ($pH_{изт}$) исследуемых образцов: № 1 — 5,96; № 2 — 5,82; № 3 — 10,43.

Результаты определения сорбции анализируемых гранулированных образцов обеих серий методом колориметрии представлены в табл. 6.

Из этих данных следует, что гранулирование брусито-глинистых смесей изучаемых образцов практически не снижает их сорбционную ёмкость по отношению к меди (по сравнению с порошками смесей). Это позволяет рекомендовать данные гранулированные смеси для промышленного производства с последующим их применением для решения различных экологических проблем, включая очистку сточных вод от ТМ, концентрирование ТМ, изготовление сорбционных защитных барьеров на пути фильтрации токсичных веществ и др. При этом вопрос о десорбции ТМ и вторичном использовании сорбентов требует отдельного изучения.

Таблица 6. Результаты определения сорбции гранулированных образцов по отношению к меди

№ серии	№ образца	Температура обжига, °С	Диаметр гранул, мм	Сорбционная ёмкость к Cu, мг/г
1-я	18г	600	3,5-6	100
	23г	600	3,5-6	114
	24г	600	3,5	65
2-я	25г	780	3,5-5	114
	26г	600	< 3,5	161
	27г	600	> 5	99
	28г	600	3,5-5	161
	29г	750	3,5-5	150

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Обе изученные глины (образцы № 1 и № 2) имеют низкую физико-химическую активность и гидрофильность, не гигроскопичны, характеризуются весьма малой сорбционной ёмкостью по отношению к меди (сотые доли мг/г) и другим ТМ, вследствие чего могут применяться лишь как наполнитель при изготовлении гранулированных сорбентов или для целей утилизации.

2. Сорбционная ёмкость изученного природного брусита (марки БРКМ) по отношению к меди аномально высока и составляет порядка 180 — 200 мг/г, что позволяет использовать его в смесях с указанными глинами для получения материалов с высокой сорбционной активностью по отношению к ТМ и в барьерных технологиях.

3. Термическая модификация брусита (обжиг при 600 °С в течение 1 ч) позволяет существенно повысить его сорбционную способность благодаря "разрыхлению" кристаллической структуры и появлению ряда новообразований — минералов и веществ, обеспечивающих возможную хемосорбцию ТМ.

4. Сорбционная ёмкость смесей глин с термически модифицированным бруситом при соотношении 1:1 (по массе) составляет по меди 240 — 280 мг/г, что свидетельствует о возможности их использования в качестве эффективных сорбентов и в барьерных технологиях.

5. Гранулирование брусито-глинистых смесей не снижает их сорбционную способность, что позволяет рекомендовать их для промышленного производства и последующего применения для ре-

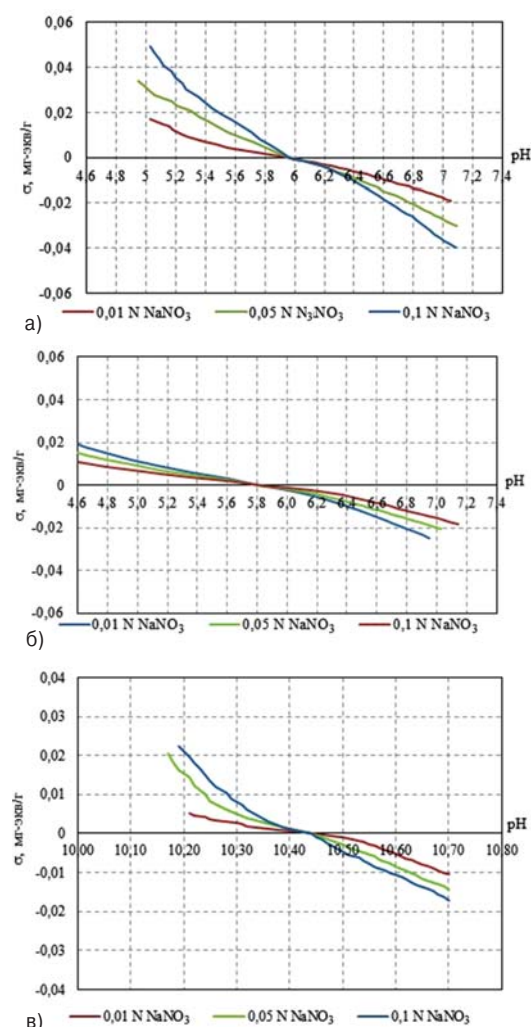


Рис. 4. Результаты потенциометрического титрования образцов № 1 — 3 при определении точки нулевого заряда:
а — № 1; б — № 2; в — № 3

шения всевозможных экологических проблем, связанных с очисткой сточных вод от ТМ путем их концентрирования, созданием сорбционных защитных барьеров на пути фильтрации токсичных веществ и др.

Литература

1. Бочкарев Г.Р., Г.И. Пушкарёва, С.А. Бобылева. Влияние некоторых физико-химических и технологических факторов на сорбционную ёмкость брусита // Известия вузов. Строительство. 2003. № 9. С.113-116.
2. Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И., Коваленко К.А. Сорбционная очистка водных сред от мышьяка с использованием природного и модифицированного брусита // Известия вузов. Строительство. 2011. № 6. С.59-64.
3. Склярёва Г.Ф. Перспективы комплексного использования магнетитового сырья месторождений Дальнего Востока // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С.302-309.
4. Пушкарёва Г.И. Сорбционное извлечение металлов из моно- и поликомпонентных растворов с использованием брусита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 6. С.110-113.
5. Бобылева С.А. Сорбционная очистка сточных вод от ионов тяжёлых металлов с применением брусита: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2005. 21 с.
6. Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И. О десорбции металлов и регенерации брусита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2006. № 5. С.115-119.
7. Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И., Ростовцев В.И. Интенсификация процессов рудоподготовки и сорбционного извлечения металлов из техногенного сырья // ФТПРПИ. 2007. № 3. С.129-139.
8. Коваленко К.А. Сорбционная очистка сточных вод горно-перерабатывающих предприятий от мышьяка с использованием природных минералов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Пермь, 2013. 23 с.
9. Lei Shao, Zhou Y., Chen J.F., Weitao Wu, Lu S.C. Buffer behavior of brucite in removing copper from acidic solution // Minerals Engineering. 05/2005; 18(6):639-641. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.09.009.
10. Morimoto K.; Sato T.; Yoneda T. Complexation reactions of oxyanions on brucite surfaces // Journal of the Clay Science Society of Japan. 2009. V. 48. No. 1. P.9-17.
11. Kun He, Yu Ming Dong, Zhen Li, Lin Yin, Ai Min Zhang, Yi Chun Zheng. Catalytic ozonation of phenol in water with natural brucite and magnesia // Journal of Hazardous Materials. 03/2008. 159(2-3):587-92. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.02.061.
12. Pitois A., Ivanov P.I., Abrahamsen L.G., Bryan N.D., Taylor R.J., Sims H.E. Magnesium hydroxide bulk and colloid-associated ¹⁵²Eu in an alkaline environment: colloid characterization and sorption properties in the presence and absence of carbonate // Journal of Environmental Monitoring. 04/2008. 10(3):315-24. DOI:10.1039/b714636c.
13. Ерёмин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: Изд-во Моск. ун-та, Академкнига, 2007. 459 с.
14. Гумерова Ю.А. Влияние температуры обжига на свойства брусита // IX Междунар. конф. студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». Томск, 2012. С.345-347.
15. Зырянова В.Н. Магнезиальные вяжущие вещества из отходов обогащения брусита // Строительные материалы. 2006. Апрель. С.61-64.
16. Лабораторные работы по грунтоведению: учеб. пособие // Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королёва. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
17. Пушкарёва Г.И. Влияние температурной обработки брусита на его сорбционные свойства // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. № 2. С.102-108.
18. Соколова Т.Н., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула: Изд-во "Гриф и К", 2009. 172 с.

References

1. Bochkarev G.R., G.I. Pushkareva, S.A. Bobileva. Vliyanie nekotorykh fiziko-khimicheskikh i tekhnologicheskikh faktorov na sorbtionnyuyu emkost' brusita // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2003. № 9. S.113-116.
2. Bochkarev G.R., Pushkareva G.I., Kovalenko K.A. Sorbtionnaya ochistka vodnykh sred ot mysh'yaka s ispol'zovaniem prirodnoy i modifitsirovannoy brusita // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2011. № 6. S.59-64.
3. Sklyarova G.F. Perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya magnezitovogo syr'ya mestorozhdenii Dal'nego Vostoka // Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2012. № 1. S.302-309.
4. Pushkareva G.I. Sorbtionnoe izvlechenie metallov iz mono- i polikomponentnykh rastvorov s ispol'zovaniem brusita // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 1999. № 6. S.110-113.
5. Bobileva S.A. Sorbtionnaya ochistka stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov s primeneniem brusita: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2005. 21 s.
6. Bochkarev G.R., Pushkareva G.I. O desorbtsii metallov i regeneratsii brusita // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2006. № 5. S.115-119.
7. Bochkarev G.R., Pushkareva G.I., Rostovtsev V.I. Intensifikatsiya protsessov rudopodgotovki i sorbtionnogo izvlecheniya metallov iz tekhnogennogo syr'ya // FTRPI. 2007. № 3. S.129-139.
8. Kovalenko K.A. Sorbtionnaya ochistka stochnykh vod gorno-pererabatyvayushchikh predpriyatii ot mysh'yaka s ispol'zovaniem prirodnykh mineralov: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Perm', 2013. 23 s.
9. Lei Shao, Zhou Y., Chen J.F., Weitao Wu, Lu S.C. Buffer behavior of brucite in removing copper from acidic solution // Minerals Engineering. 05/2005; 18(6):639-641. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.09.009.
10. Morimoto K.; Sato T.; Yoneda T. Complexation reactions of oxyanions on brucite surfaces // Journal of the Clay Science Society of Japan. 2009. V. 48. No. 1. P.9-17.
11. Kun He, Yu Ming Dong, Zhen Li, Lin Yin, Ai Min Zhang, Yi Chun Zheng. Catalytic ozonation of phenol in water with natural brucite and magnesia // Journal of Hazardous Materials. 03/2008. 159(2-3):587-92. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.02.061.
12. Pitois A., Ivanov P.I., Abrahamsen L.G., Bryan N.D., Taylor R.J., Sims H.E. Magnesium hydroxide bulk and colloid-associated ¹⁵²Eu in an alkaline environment: colloid characterization and sorption properties in the presence and absence of carbonate // Journal of Environmental Monitoring. 04/2008. 10(3):315-24. DOI:10.1039/b714636c.
13. Eremin N.I. Nemetallicheskie poleznye iskopaemye. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, Akademkniga, 2007. 459 s.
14. Gumerova Yu.A. Vliyanie temperatury obzhiga na svoistva brusita // IX Mezhdunar. konf. studentov i molodykh uchenykh «Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk». Tomsk, 2012. S.345-347.
15. Zyryanova V.N. Magnezial'nye vyazhushchie veshchestva iz otkhodov obogashcheniya brusita // Stroitel'nye materialy. 2006. Aprel'. S.61-64.
16. Laboratornye raboty po gruntovedeniyu: ucheb. posobie // Pod red. V.T. Trofimova i V.A. Koroleva. M.: Vysshaya shkola, 2008. 519 s.
17. Pushkareva G.I. Vliyanie temperaturnoi obrabotki brusita na ego sorbtionnyye svoistva // Fiz.-tekhn. problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2010. № 2. S.102-108.
18. Sokolova T.N., Trofimov S.Ya. Sorbtionnyye svoistva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyi obmen. Tula: Izd-vo "Grif i K", 2009. 172 s.

Королёв В.А. – д-р геол.-минерал. наук, профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119899 Россия, г. Москва, ГСП, Ленинские горы, 1, e-mail: va-korolev@bk.ru • Самарин Е.Н. – канд. геол.-минерал. наук, доцент, e-mail: samarinen@mail.ru • Панфилов В.А. – ген. директор, ООО "Мировые Экологические Стандарты", 119048 Россия, г. Москва, Лужнецкая наб., д. 2/4, стр. 16 офис. 303, e-mail: panfil@fsystem.ru • Романова И.В. – магистрант, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119899, г. Москва, ГСП, Ленинские горы, 1, e-mail: romirv@mail.ru

Korolev V.A. – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Lomonosov Moscow State University, 119899 Russia, Moscow, CEDEX, Leninskiye Gory, 1, e-mail: va-korolev@bk.ru • Samarin E.N. – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor, e-mail: samarinen@mail.ru • Panfilov V.A. – General Director, OOO "Miroviye Ecologicheskiye Standarty", 119048 Russia, Moscow, Luzhnetskaya Emb., 2/4, bld. 16, suite 303, e-mail: panfil@fsystem.ru • Romanova I.V. – Master's Degree Student, Lomonosov Moscow State University, 119899 Russia, Moscow, CEDEX, Leninskiye Gory, 1, e-mail: romirv@mail.ru