МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ ПРИ ЩЕЛОЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ САПРОПЕЛЯ

Ш.Ш.к.Рашитова[1]

1. Преподаватель Азиатского международного университета

Mas'ul muallif: Рашитова Шахноза Шухрат кизи, Преподаватель Азиатского международного университета.

Received: 11 Noyabr 2026
Accepted: 16 Noyabr 2026
Published: 21 Noyabr 2026

Copyright: © 2026 by the author(s). Licensee Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi.

Iqtibos uchun: Рашитова, Ш. Ш. к. МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ ПРИ ЩЕЛОЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ САПРОПЕЛЯ / Ш. Ш. к. Рашитова // Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi. — 2026. — Т. 11, № 2. — В. 123–128.

Аннотация. При экстракции гуминовых и фульвокислот из сапропеля раствором гидроксида калия твёрдый остаток отделяется от жидкого удобрения. Сохранение в нём железа и алюминия определяет перспективность дальнейшего использования остатка в качестве сорбента. Исследовано влияние концентрации KOH (1, 2 и 3%), температуры (40–90 °C) и соотношения жидкость : твёрдое (1:1–3:1) на pH среды и переход Al и Fe в жидкую фазу. Значение pH изменялось от 6,53 до 10,92, степень извлечения алюминия - от 0,72 до 14,20%, железа - от 2,5 до 9,7%. Вследствие амфотерности алюминия при 3% KOH и pH > 9,3 его переход в раствор резко усиливался; при 1–2% KOH он оставался низким. Железо во всех режимах преимущественно сохранялось в твёрдой фазе. В рекомендуемом режиме - 2% KOH, Ж:Т = 2,5:1, 80 °C и pH 8,66 - в раствор переходило 3,19% Al и 5,0% Fe, тогда как 96,81% Al и 95,0% Fe оставались в твёрдом остатке. Высокая сохранность металлсодержащих минеральных компонентов создаёт предпосылки для использования остатка как сорбента тяжёлых металлов. Режим обеспечивает баланс между извлечением гуминовых веществ, качеством жидкого удобрения и сорбционным потенциалом твёрдого продукта.

Ключевые слова: сапропель, гидроксид калия, pH среды, железо, алюминий, амфотерность, межфазное распределение, твёрдый остаток, сорбент.

INTERPHASE DISTRIBUTION OF IRON AND ALUMINUM DURING ALKALINE PROCESSING OF SAPROPEL

Abstract. During the extraction of humic and fulvic acids from sapropel with potassium hydroxide, a solid residue is separated from the liquid fertilizer. Retention of iron and aluminum in this residue is important for its subsequent use as a sorbent. This study examined the effects of KOH concentration (1, 2, and 3%), temperature (40–90 °C), and liquid-to-solid ratio (1:1–3:1) on medium pH and the transfer of Al and Fe into the liquid phase. The pH ranged from 6.53 to 10.92; aluminum extraction varied from 0.72 to 14.20%, and iron extraction from 2.5 to 9.7%. Owing to the amphoteric behavior of aluminum, its dissolution increased sharply at 3% KOH and pH > 9.3, whereas it remained low at 1–2% KOH. Iron was retained predominantly in the solid phase under all conditions. Under the recommended conditions-2% KOH, a liquid-to-solid ratio of 2.5:1, 80 °C, and pH 8.66-only 3.19% of Al and 5.0% of Fe entered the solution, while 96.81% of Al and 95.0% of Fe remained in the solid residue. The high retention of metal-containing mineral components supports the use of this residue as a heavy-metal sorbent. The selected regime balances humic-substance recovery, liquid-fertilizer quality, and sorption potential of the solid product.

Keywords: sapropel, potassium hydroxide, medium pH, iron, aluminum, amphoterism, interphase distribution, solid residue, sorbent.

1. Введение. Экстракция гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором гидроксида калия является перспективным способом получения жидкого органоминерального удобрения. Процесс формирует два продукта: жидкую фазу, обогащённую гуминовыми веществами, и твёрдый остаток. Использование твёрдого остатка в качестве сорбента тяжёлых металлов позволяет развивать комплексную низкоотходную переработку сапропеля в соответствии с принципами циркулярной экономики.

Присутствие свинца, кадмия, меди, цинка и других токсичных элементов в промышленных и сельскохозяйственных сточных водах представляет серьёзную угрозу окружающей среде и здоровью человека. Для их удаления востребованы недорогие сорбенты из местного сырья. Твёрдый остаток после переработки сапропеля содержит минеральный каркас и металлсодержащие (гидр)оксидные фазы, поэтому может служить исходным материалом для такого сорбента.

Эффективность сорбционного материала во многом определяется содержанием (гидр)оксидов железа и алюминия. Ферригидрит, гётит, гематит и

магнетит широко применяются для удаления металлов благодаря доступности и способности связывать загрязнители посредством поверхностного комплексообразования, ионного обмена и соосаждения. Гидроксильные группы на поверхности металлсодержащих фаз обеспечивают связывание катионов Cu, Pb и Cd, а также фосфатных и мышьяксодержащих анионных форм путём лигандного обмена [1–3].

Поэтому при щелочной экстракции необходимо оценивать сохранение железа и алюминия в твёрдой фазе. Гидроксид алюминия амфотерен: $Al(OH)_3$ малорастворим в воде, но в сильнощелочной среде образует растворимые алюминатные формы, в частности $[Al(OH)_4]^-$. При повышении pH выше области точки нулевого заряда его растворимость возрастает. Соединения Fe(III) в исследованном диапазоне pH более устойчивы и преимущественно остаются в твёрдой фазе. Следовательно, повышение концентрации щёлочи должно в первую очередь усиливать переход алюминия в раствор [4–9].

Цель работы - изучить влияние концентрации KOH, температуры и соотношения жидкость : твёрдое на pH среды и межфазное распределение железа и алюминия при переработке сапропеля, определить их сохранность в твёрдой фазе в рациональном режиме и оценить перспективность остатка как сырья для сорбента.

Такой подход дополняет оптимизацию извлечения гуминовых веществ: выбор режима только по выходу жидкого удобрения может привести к недооценке потерь Al и Fe и ухудшению свойств твёрдого продукта. Поэтому жидкое удобрение и твёрдый сорбционный материал необходимо рассматривать как взаимосвязанные продукты единой технологии.

2. Объект и методы исследования

Объектом исследования служил образец сапропеля С-0, отобранный на высохшем дне Аральского моря. Образец высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и приводили к однородной дисперсности.

Сапропель обрабатывали растворами KOH с концентрацией 1, 2 и 3% при соотношениях Ж:Т = 1:1; 1,5:1; 2:1; 2,5:1 и 3:1 и температурах 40, 50, 60, 70, 80 и 90 °C при постоянном перемешивании. После обработки суспензию разделяли на жидкую и твёрдую фазы фильтрованием или центрифугированием.

pH отделённой жидкой фазы измеряли потенциометрически. Содержание железа и алюминия в растворе определяли стандартными инструментальными методами - атомно-абсорбционной спектроскопией или спектрофотометрически - в соответствии с применяемой аналитической схемой. Степень перехода каждого элемента в жидкую фазу рассчитывали по формуле:

$E = (m_{раств} / m_0) \times 100\%$,

где E - доля элемента, перешедшего в жидкую фазу, %; $m_{раств}$ - масса элемента в растворе; m_0 - общее исходное содержание элемента в сапропеле. Долю элемента, оставшегося в твёрдой фазе, определяли как (100 – E), % [10, 11].

3. Результаты и обсуждение

Полученные зависимости pH среды и степени перехода железа и алюминия в раствор от концентрации KOH и температуры представлены на рисунках 1–4. Межфазное распределение элементов в рекомендуемом режиме приведено в таблице 1 и на рисунке 5.

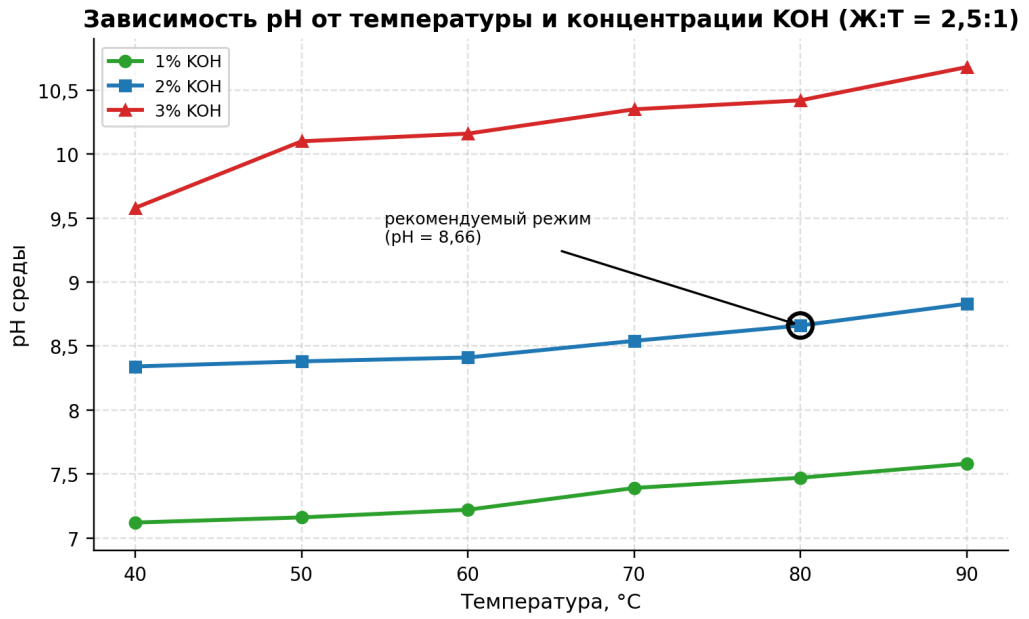


Рисунок 1 - Зависимость pH среды от температуры и концентрации KOH при Ж:Т = 2,5:1

Значение pH определялось главным образом концентрацией KOH. Во всей совокупности исследованных режимов при 1% KOH оно изменялось в пределах 6,53–7,78, при 2% KOH - 7,92–8,91, при 3% KOH - 9,35–10,92. Температура и соотношение Ж:Т оказывали менее выраженное влияние, обычно повышая pH на 0,1–0,3 единицы на очередной ступени варьирования. В рекомендуемом режиме - 2% KOH, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °C - pH составлял 8,66,

что соответствует умеренно щелочной среде.

Переход алюминия в раствор оказался особенно чувствительным к pH (рисунок 2). При 1 и 2% KOH и pH < 9 степень его извлечения оставалась низкой: соответственно 0,72–1,69 и 1,37–3,72%. При 3% KOH и pH 9,35–10,92 она резко увеличивалась - от 4,94 до 14,20%. Наблюдаемая зависимость обусловлена амфотерностью $Al(OH)_3$ и образованием растворимых алюминатных форм в щелочной среде [4, 5].

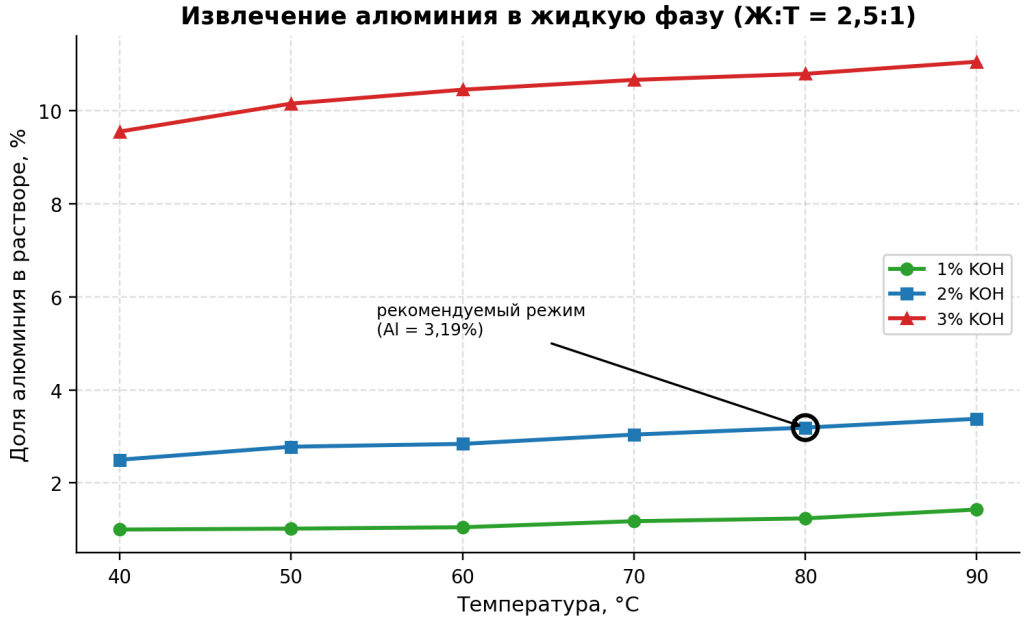


Рисунок 2 - Зависимость перехода алюминия в жидкую фазу от температуры и концентрации KOH при Ж:Т = 2,5:1

Степень перехода железа в раствор во всех режимах была сравнительно низкой (рисунок 3): при 1% KOH - 2,5–3,7%, при 2% - 3,9–5,5%, при 3% - 6,4–9,7%. В отличие от алюминия, соединения Fe(III) в данном диапазоне pH преимущественно сохранялись в малорастворимой твёрдой форме, поэтому железо в основном оставалось в остатке [6].

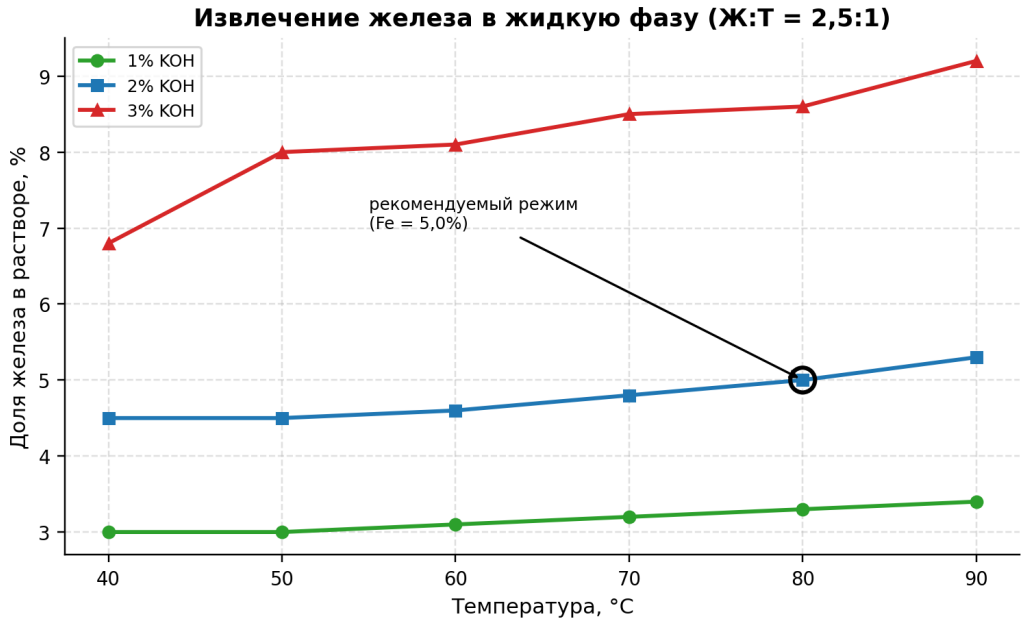


Рисунок 3 - Зависимость перехода железа в жидкую фазу от температуры и концентрации KOH при Ж:Т = 2,5:1

Повышение температуры умеренно усиливало переход обоих элементов, однако этот эффект был значительно слабее влияния концентрации KOH. При 2% KOH и Ж:Т = 2,5:1 повышение температуры от 40 до 90 °C увеличивало переход алюминия с 2,54 до 3,38% - на 0,84 процентного пункта, а железа - с 4,5 до 5,3%. Следовательно, температура 80 °C, необходимая для эффективной экстракции гуминовых веществ, не приводит к существенной потере Al и Fe из твёрдой фазы.

На рисунке 4 показано влияние концентрации KOH при 80 °C и Ж:Т = 2,5:1. При повышении концентрации

от 1 до 2% переход Al увеличивался с 1,24 до 3,19%, Fe - с 3,3 до 5,0%. При переходе от 2 к 3% KOH доля Al в растворе возрастала более чем втрое - с 3,19 до 10,79%, а Fe - с 5,0 до 8,6%. Таким образом, применение 3% KOH усиливает потерю обоих элементов, особенно алюминия.

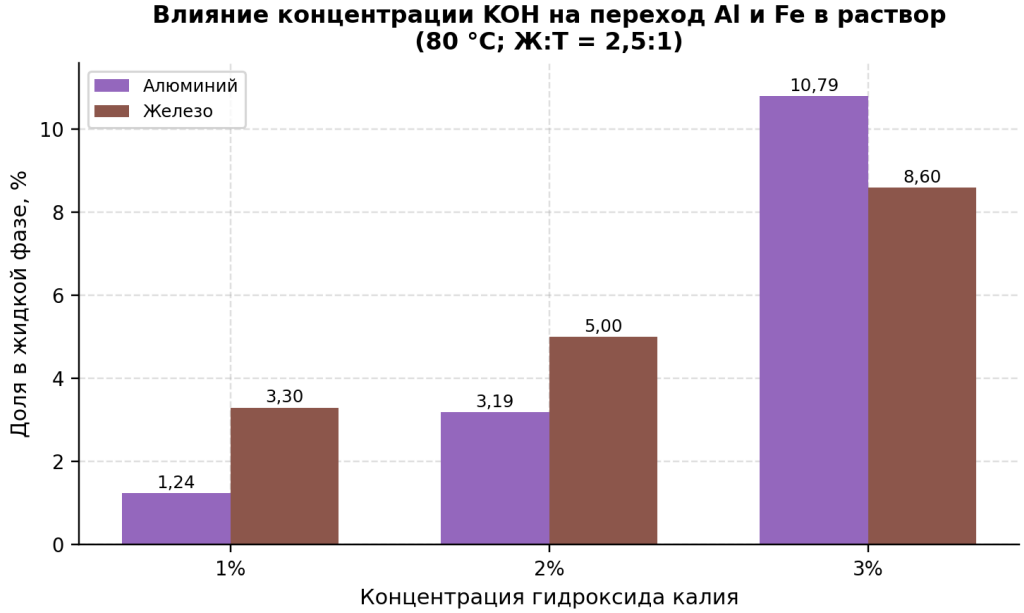


Рисунок 4 - Влияние концентрации KOH на переход алюминия и железа в жидкую фазу при 80 °C и Ж:Т = 2,5:1

Наиболее значимым фактором межфазного распределения была концентрация KOH, действующая через pH среды. При 80 °C и Ж:Т = 2,5:1 повышение концентрации с 1 до 3% увеличивало переход алюминия примерно в 8,7 раза - с 1,24 до 10,79%. Температура оказывала умеренное влияние, а соотношение Ж:Т - наименьшее. Для железа наблюдалась та же последовательность факторов, но диапазон изменений был существенно уже. Поэтому удержание концентрации KOH около 2% является ключевым условием сохранения Al и Fe в твёрдом продукте.

В качестве рационального принят режим 2% KOH, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °C. Он обеспечивает высокое извлечение гуминовых веществ и ограничивает переход минеральных компонентов в удобрение. При pH 8,66 в раствор переходило только 3,19% Al и 5,0% Fe; соответственно 96,81% Al и 95,0% Fe сохранялось в твёрдом остатке.

Таблица 1.

Межфазное распределение железа и алюминия в рекомендуемом режиме (2% KOH; Ж:Т = 2,5:1; 80 °C)

Показатель	Алюминий (Al)	Железо (Fe)	Примечание
Доля, перешедшая в жидкую фазу, %	3,19	5,0	переходит в удобрение
Доля, оставшаяся в твёрдой фазе, %	96,81	95,0	сохраняется в сорбенте
pH среды	8,66	8,66	умеренно щелочная среда

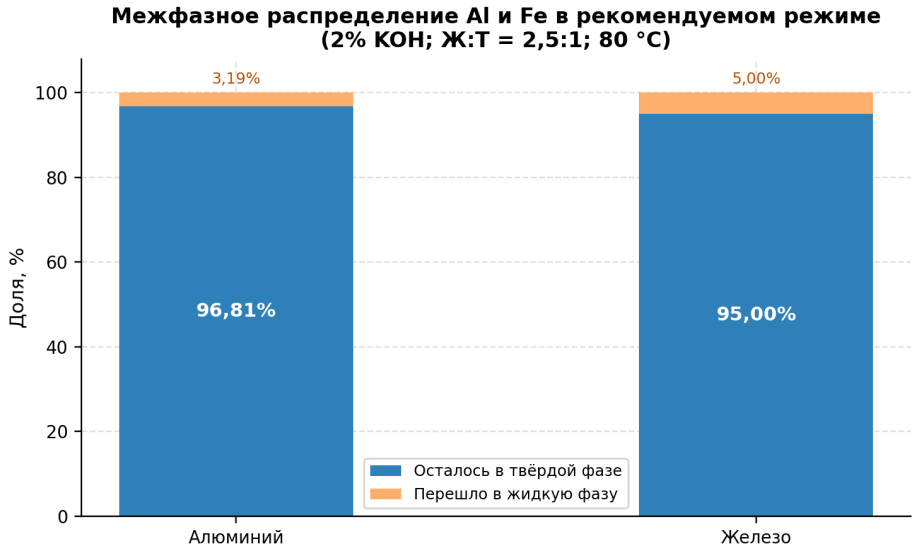


Рисунок 5 - Распределение алюминия и железа между твёрдой и жидкой фазами в рекомендуемом режиме

Сохранение 95–97% железа и алюминия в твёрдом остатке благоприятно для его дальнейшего использования. Поверхностные гидроксильные группы Fe- и Al-содержащих (гидр)оксидов способны связывать тяжёлые металлы и анионные загрязнители посредством поверхностного комплексообразования и лигандного обмена [2, 3]. Одновременно ограниченный переход алюминия в жидкую фазу повышает качество удобрения, поскольку избыток биодоступного Al может проявлять фитотоксичность.

Сорбционный потенциал минеральных остатков, богатых Fe и Al, подтверждается применением красного шлама и золы-уноса в качестве недорогих адсорбентов фосфатов и тяжёлых металлов [8]. Сапропелевый остаток с высокой сохранностью этих элементов может обладать аналогичными свойствами; оставшиеся гуминовые фрагменты способны дополнительно обеспечивать катионообменные центры. Однако фактическая сорбционная ёмкость должна быть подтверждена отдельными изотермическими, кинетическими и регенерационными исследованиями.

Применение 3% KOH лишь незначительно увеличивает извлечение гуминовых веществ, но существенно усиливает вымывание алюминия и может снижать сорбционную ценность твёрдого остатка. Это подтверждает рациональность 2% KOH: при такой концентрации достигаются высокий выход жидкого удобрения, сохранность минеральных сорбционных центров и меньший расход реагента.

Комплексная оптимизация должна учитывать все три фактора. Температура 80 °C и Ж:Т = 2,5:1 необходимы для высокой степени извлечения гуминовых и фульвокислот и при этом не вызывают существенного перехода Al и Fe в раствор. Повышение KOH с 2 до 3% увеличивает извлечение гуминовых веществ примерно на один процентный пункт, но более чем втрое усиливает потерю алюминия. Поэтому режим 2% KOH, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °C представляет единый компромисс между выходом удобрения, качеством твёрдого продукта и ресурсной эффективностью.

4. Заключение.

1. pH среды определяется преимущественно концентрацией KOH: при 1% KOH он составляет 6,53–7,78, при 2% - 7,92–8,91, при 3% - 9,35–10,92; влияние температуры и соотношения Ж:Т менее выражено.

2. Вследствие амфотерности алюминия его переход в раствор резко возрастает при pH > 9 и 3% KOH, достигая 14,20%; при 1–2% KOH он не превышает 3,72%. Железо во всех режимах преимущественно остаётся в твёрдой фазе, а доля его перехода в раствор составляет 2,5–9,7%.

3. В рациональном режиме - 2% KOH, Ж:Т = 2,5:1, 80 °C и pH 8,66 - в твёрдом остатке сохраняется 96,81% Al и 95,0% Fe. Такой состав благоприятен для последующей разработки сорбента тяжёлых металлов.

4. Использование 3% KOH усиливает вымывание алюминия и неблагоприятно для качества твёрдого сорбционного материала. С точки зрения баланса между извлечением гуминовых веществ, качеством удобрения и сорбционным потенциалом остатка предпочтителен режим с 2% KOH.

Список использованной литературы

[1] Mashale K., Mogashane T. M., Madzivha P., Motlatle M. A., Mokoena L., Tshilongo J. Iron oxide and hydroxides for the removal of heavy metals from wastewater // Current Research on Mineralogy: Minerals Characterization and Their Applications. IntechOpen, 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1010016.

[2] Hira N. E., Lock S. S. M., Arshad U. et al. Screening of metal oxides and hydroxides for arsenic removal from water using molecular dynamics simulations // ACS Omega. 2023. Vol. 8, No. 50. P. 48130–48144. DOI: 10.1021/acsomega.3c07014.

[3] Boruah H., Tyagi N., Gupta S. K., Chabukdhara M., Malik T. Understanding the adsorption of iron oxide nanomaterials in magnetite and bimetallic form for the removal of arsenic from water // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol.

11. Art. 1104320.

[4] Kudryavtsev P. Aluminum hydroxide based anion exchange materials // Scientific Israel: Technological Advantages. 2020. Vol. 22, No. 1.

[5] Бричкин В. Н. и др. Влияние калия на растворимость гидроксида алюминия в щелочных алюминатных растворах и их декомпозицию // Записки Горного института. 2012. Т. 196. С. 113–116.

[6] Gayer K. H., Thompson L. C., Zajicek O. T. The solubility of aluminum hydroxide in acidic and basic media at 25 °C // Canadian Journal of Chemistry. 1958. Vol. 36, No. 9. P. 1268–1271. DOI: 10.1139/v58-184.

[7] Жук А. З., Клейменов Б. В., Захаров В. П., Чурсин А. Ю., Капустин А. В. Исследование состава и физико-химических свойств щелочного электролита в процессе анодного растворения алюминия в воздушно-алюминиевых топливных элементах // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 4. С. 108–115.

[8] Li M., Liu J., Xu Y., Qian G. Phosphate adsorption on metal oxides and metal hydroxides: A comparative review // Environmental Reviews. 2016. Vol. 24, No. 3. P. 319–332. DOI: 10.1139/er-2015-0080.

[9] Cheng G., Niu Z., Zhang C., Zhang X., Li X. Extraction of humic acid from lignite by KOH-hydrothermal method // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 7. Art. 1356. DOI: 10.3390/app9071356.

[10] Platonova D. S., Adeeva L. N. Use of humic sorbent from sapropel for extraction of palladium ions from chloride solutions // Open Engineering. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 176–181. DOI: 10.1515/eng-2018-0023.

[11] Swift R. S. Organic matter characterization // Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. 1996. Vol. 5. P. 1011–1069.