

УДК 546.05

## Получение и сорбционные свойства «белой сажи» из отходов борного производства

©2025 г. Г. Ф. Крысенко<sup>1</sup>, П. С. Гордиенко<sup>1</sup>, С. Б. Ярусова<sup>1,2</sup>,  
А. Е. Панасенко<sup>1</sup>, Е. И. Войт<sup>1</sup>, И. Ю. Буравлев<sup>3</sup>, А. А. Буравлева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, пр. 100-летия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия

<sup>2</sup>Владивостокский государственный университет, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, 690014, Россия

<sup>3</sup>Дальневосточный федеральный университет, п.Аякс,10, о. Русский, г. Владивосток, 690922, Россия

e-mail: [yarusova\\_10@mail.ru](mailto:yarusova_10@mail.ru)

Поступила в редакцию 00.00.2025 г.

### АННОТАЦИЯ

Изучена возможность получения аморфного диоксида кремния («белой сажи») при обработке отходов производства борной кислоты (борогипса) гидродифторидом аммония  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ . Установлен элементный, фазовый, гранулометрический состав, морфология полученного соединения. Исследованы сорбционные свойства катионного органического красителя – метиленового синего (МС). Получена и проанализирована моделями химической кинетики кинетическая кривая сорбции МС при температуре 20 °C.

**Ключевые слова:** борогипс, диоксид кремния, белая сажа, гидродифторид аммония, метиленовый синий, сорбция, кинетика.

## ВВЕДЕНИЕ

Гидратированный кремнезем  $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  («белая сажа») широко применяется в качестве адсорбента, как активный минеральный наполнитель в лакокрасочных композициях, резинотехнической, полимерной, строительной и других отраслях промышленности. Источником получения «белой сажи» являются различные виды минерального сырья и отходы его переработки [1–4]. Примером таких отходов может служить борсодержащее сырье и отходы его переработки в виде борогипса [5–11]. Предлагаются различные технологические схемы переработки борогипса, в том числе, с получением «белой сажи», в которых используются флотационные реагенты, а также неорганические кислоты.

Известен способ переработки борогипса [6], включающий его репульпацию, извлечение дигидрата сульфата кальция в пенный продукт флотацией с применением флотационных реагентов, обезвоживание гипса до полуgidрата сульфата кальция, его сушку и измельчение. Кроме сульфата кальция в данной работе в результате флотационного разделения шлама получили камерный продукт с содержанием диоксида кремния  $\text{SiO}_2 > 75\%$ , который было предложено выщелачивать растворами азотной кислоты для получения диоксида кремния высокой чистоты [7].

Авторами [8, 9] предложена технологическая схема переработки борогипса, включающая одну операцию обратной флотации с использованием для данного типа сырья реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия (торговое название – перластан ON-60, химический состав –  $C_{17}H_{33}CON(CH_3)CH_2COONa$ ). Установлены рациональные режимные параметры обогащения, позволяющие исключить образование техногенных отходов и получить два готовых продукта (гипсовый и кремниевый). Показатель извлечения кремния увеличен на 30,46 %, содержание диоксида кремния достаточно для дальнейшего передела продукта в «белую сажу».

Авторами [11] предложен способ получения белой сажи путем смешивания борогипса с флюоритовым концентратом в соотношении 1:2 с последующей обработкой серной кислотой при нагревании до температуры 150–200°C до образования пульпы. Выделяющийся в ходе реакции  $SiF_4$  улавливают в скрубберах раствором фторида аммония с образованием комплексной водорастворимой соли  $(NH_4)_2SiF_6$ , которую гидролизуют 25 % раствором аммиака при pH 9 с осаждением аморфного кремнезема. После отделения на фильтрах получают  $SiO_2$  и раствор фторида аммония, который может быть использован в технологическом цикле. Чистота кремнезема зависит от чистоты и степени отмычки от фонового раствора фторида аммония. Выделенный сульфат кальция используется для получения  $CaF_2$  путем реакции с раствором фторида аммония с целью его возврата в

технологическую линию. Полученный фильтрат упаривается для получения аммонийного удобрения  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . В предлагаемом способе переработки отходов основные реагенты являются возвратными.

Все предлагаемые варианты требуют тщательного анализа, как с технологической, так и с экономической позиций.

Цель данной работы – изучение возможности получения «белой сажи» при обработке отходов производства борной кислоты (борогипса) гидродифторидом аммония  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

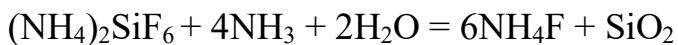
### *Получение «белой сажи»*

Для проведения исследования борогипс (с содержанием основных компонентов, масс. %:  $\text{SiO}_2$  – 26–28;  $\text{CaO}$  – 26–28;  $\text{SO}_4^{2-}$  – 38–40;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1,8–2;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,6–0,8;  $\text{B}_2\text{O}_3$  – 0,7–1,2;  $\text{MnO}$  – 0,2;  $\text{MgO}$  – 0,1–0,2) смешивали с гидродифторидом аммония марки «х.ч.». Полученную смесь нагревали в муфельной печи до температуры 180 °C и выдерживали при этой температуре в течение 3 ч. Затем проводили водное выщелачивание полученного профторированного продукта при Т:Ж = 1:5 с последующим отделением нерастворимого осадка от раствора фильтрованием через фильтр «синяя лента» [12].

Профторированный гидродифторидом аммония борогипс, по данным рентгенофазового анализа является смесью комплексной фтораммониевой соли кремния  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ , сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и флюорита  $\text{CaF}_2$ .

Таким образом, нерастворимый продукт выщелачивания, представляющий собой  $\text{CaF}_2$ , может быть использован как высококачественный плавикошпатовый концентрат для сварочных материалов.

К фильтрату, полученному при выщелачивании профторированного продукта, медленно, по каплям, при постоянном перемешивании приливали раствор аммиака. Раствор мутнеет и постепенно образуется гель (*далее –  $\text{SiO}_2$  (раствор)*), который при стоянии уплотняется. Взаимодействие может быть описано следующим уравнением:



Полученный осадок, представляющий собой прозрачную гелеобразную массу, отделяли от раствора фильтрованием через бумажный фильтр «синяя лента», промывали дистиллированной водой и сушили при температуре 70 °C.

Для очистки полученных образцов аморфного диоксида кремния от примеси железа использовали метод возгонки  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  (температура возгонки  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  равна 319 °C [13]). Для этого после окончания процесса фторирования борогипса гидродифторидом аммония при температуре 180 °C температуру электропечи поднимали до 350 °C и выдерживали при этой температуре в течение 2 ч. В этих условиях при проведении процесса фторирования в помещенной в электропечь никелевой трубке, один конец которой с образцом нагревали, а другой использовали в качестве конденсатора летучих продуктов, в конденсаторе сублимируется порошок

белого цвета, который согласно данным рентгенофазового анализа представляет собой  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ . Затем собранный возгон растворяли в дистиллированной воде и раствором аммиака осаждали аморфный диоксид кремния (*далее –  $\text{SiO}_2$  (возгон)*).

### *Методы анализа*

Дифрактограммы образцов снимали на автоматическом дифрактометре D8 ADVANCE (Германия) с вращением образца в  $\text{Cu K}_\alpha$ -излучении. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2.

Для количественного определения элементного состава образца применен энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный метод с использованием спектрометра Shimadzu EDX 800 HS (Япония).

Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием прибора “Сорбтометр-М” (Россия).

ИК-спектры образцов снимали в области 400–4000  $\text{см}^{-1}$  с использованием Фурье-спектрометра «Shimadzu FTIR Prestige-21» («Shimadzu», Япония) при комнатной температуре. Для регистрации ИК-спектров образцы смешивали с вазелиновым маслом и полученную суспензию наносили на подложку из стекла *KRS-5*.

Изучение морфологических характеристик выполнено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Hitachi S5500 (Япония).

Распределение частиц исследуемых материалов по размеру определяли на лазерном анализаторе частиц «Analysette-22 NanoTec/MicroTec/XT» («Fritsch», Германия).

Для изучения адсорбционных свойств образцов «белой сажи» использовали метиленовый синий  $C_{16}H_{18}N_3SCl$  («ч.д.а.», М 319.85  $\text{г}\cdot\text{моль}^{-1}$ ). Исследование сорбции метиленового синего (MC) из водных растворов проводили в статических условиях при температуре 25 °C. К навескам образца прибавляли раствор красителя (соотношение сорбент : раствор 1 : 1000) концентрации 50–500  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$  ( $0.003\text{--}1.56 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$ ) и перемешивали в течение 40 мин. Для получения кинетических кривых адсорбции навески образцов массой 0.01 г вносили в пробирки, прибавляли 10 мл исходного водного раствора метиленового синего ( $C_0(MC)=852.2 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  ( $2.66 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$ )) и перемешивали от 1 до 60 мин.

После перемешивания суспензию центрифугировали, оптическую плотность раствора измеряли на спектрофотометре ЗОМЗ КФК-3-01 (Россия) при длине волны 657 нм.

Сорбционную емкость ( $A_c$ ,  $\text{ммоль}\cdot\text{г}^{-1}$ ) исследуемых образцов рассчитывали по формуле:

$$A_c = \frac{(C_{ucx} - C_p)}{m} \cdot V, \quad (1)$$

где  $C_{\text{исх}}$  – исходная концентрация МС в растворе,  $\text{ммоль}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  $C_p$  – равновесная концентрация МС в растворе,  $\text{ммоль}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  $V$  – объем раствора, л;  $m$  – масса сорбента, г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Характеристика диоксида кремния («белой сажи»)*

Согласно данным рентгенофазового анализа, полученные из борогипса осадки являются рентгеноаморфными (рис. 1).

Элементный состав образцов представлен в табл. 1 (примеси с содержанием менее 0,5 масс. % не учитывали).

ИК спектры полученных образцов (рис.2) сходны между собой. Наблюдаются полосы поглощения, отвечающие валентным и деформационным колебаниям связей O–H адсорбированной и связанной воды с максимумами при 3385–3402 и 1630  $\text{см}^{-1}$  соответственно. Также в спектрах образцов присутствует характерный ряд полос поглощения, отвечающих колебаниям силоксановых связей Si–O. Преобладающая полоса при 1098–1103  $\text{см}^{-1}$  отвечает асимметричным валентным колебаниям, а полосы при ~800 и 471–473  $\text{см}^{-1}$  – симметричным валентным и деформационным колебаниям соответственно [14]. Полоса в области 960  $\text{см}^{-1}$  указывает на наличие силанольных групп Si–OH.

Морфология полученных образцов характеризуется наличием агломератов наночастиц размером от 50 нм различной формы,

преимущественно шаровидной, с развитой пористой поверхностью. Размер агломератов в основном от 5 до 100 мкм (рис.3, рис.4).

Для поиска возможных областей применения кремнезема, полученного из борогипса, авторами проведены исследования, касающиеся возможности его использования в качестве адсорбента катионного органического красителя – метиленового синего.

С одной стороны, вышеуказанный краситель классифицируется как загрязнитель воды, оказывающий умеренное воздействие на здоровье человека. Поэтому очистка сточных вод и промышленных стоков, загрязненных этим поллютантом, необходима для снижения его концентрации в окружающей среде [15, 16]. С другой стороны, известно большое число работ, касающихся использования кремнезема различного происхождения в качестве адсорбента метиленового синего. В зависимости от исходного сырья, состава, структуры, способов получения и модификации  $\text{SiO}_2$  и композиционных материалов на его основе величина сорбционной емкости по метиленовому синему варьирует в широких пределах – от десятых единиц мг/г до 600–700 мг/г [17–21].

Изотерма сорбции МС образцом  $\text{SiO}_2$  (возгон) приведена на рис. 5.

Для оценки сорбционных свойств полученную изотерму анализировали в координатах уравнения Ленгмюра и эмпирического уравнения Фрейндлиха.

Уравнение Ленгмюра:

$$\frac{C_p}{A_c} = \frac{1}{A_m \cdot k} + \frac{C_p}{A_m}, \quad (I)$$

где  $C_p$  – равновесная концентрация МС в растворе;  $A_m$  – максимальная сорбционная емкость;  $k$  – константа Ленгмюра.

Константы уравнения были рассчитаны из наклона и пересечения прямых на графике в соответствующих координатах линейного уравнения  $C_p/A_c$  от  $C_p$ .

Логарифмическую форму уравнения Фрейндлиха применяли для построения линейной зависимости  $\ln A_c - \ln C_p$  и графического определения параметров  $K_F$  и  $n$ :

$$\ln a = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e, \quad (II)$$

где  $K_F$  – константа равновесия уравнения Фрейндлиха, относящаяся к сорбционной емкости;  $1/n$  – параметр, указывающий на интенсивность взаимодействия сорбент – сорбат.

Найденные графическим способом параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха представлены в табл. 2.

Из представленной таблицы видно, что процесс сорбции МС наилучшим образом описывается уравнением Ленгмюра, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции.

На рис. 6 приведена кинетическая кривая сорбции МС образцом «белой сажи» при температуре 20°C.

Полученные данные по величине сорбционной емкости от времени сорбции обработаны также в соответствии с моделями псевдопервого и псевдовторого порядка:

$$\log(A_e - A_t) = \log A_e - \frac{k_1}{2.303} t, \quad (\text{III})$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{1}{A_e} t, \quad (\text{IV})$$

где  $k_1$  – константа скорости сорбции модели псевдопервого порядка;  $k_2$  – константа скорости сорбции модели псевдовторого порядка;  $A_e$ ,  $A_t$  – сорбционная емкость в состоянии равновесия и в момент времени  $t$  соответственно.

Кажущиеся псевдоскоростные константы,  $k_1$  и  $k_2$ , соответствующие квадраты коэффициентов корреляции  $R^2$ , показывающие правильность соотнесения с кинетическими моделями псевдопервого и псевдовторого порядков, приведены в табл. 3.

Из данных, представленных в табл. 3, следует, что процесс сорбции в анализируемом временном интервале наилучшим образом описывается

моделью псевдопервого порядка, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что одним из направлений утилизации отходов борного производства может быть гидродифторидная обработка последних с получением аморфного нанодисперсного диоксида кремния, широко применяемого в различных отраслях промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность получения аморфного диоксида кремния («белой сажи») при обработке отходов производства борной кислоты (борогипса) гидродифторидом аммония  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ . Аморфный диоксид кремния с содержанием  $\text{SiO}_2$  97,1 масс.% и удельной поверхностью 199,0  $\text{m}^2/\text{г}$  получен при аммиачном гидролизе фильтрата после водного выщелачивания профторированного продукта. С целью очистки аморфного диоксида кремния от примеси железа использовали метод возгонки, в результате которого получен продукт с содержанием  $\text{SiO}_2$  99,4 масс.% и удельной поверхностью 98,6  $\text{m}^2/\text{г}$ . Исследованы сорбционные свойства диоксида кремния, полученного методом возгонки, по отношению к катионному органическому красителю – метиленовому синему. Максимальная сорбционная емкость исследуемого материала составляет 0,031  $\text{ммоль}\cdot\text{г}^{-1}$ , а процесс сорбции МС наилучшим образом описывается уравнением Ленгмюра ( $R^2=0,9964$ ). Процесс сорбции в анализируемом

временном интервале наилучшим образом описывается моделью псевдопервого порядка ( $R^2=0,9962$ ). Таким образом, гидрофторидная переработка отходов борного производства позволяет получить аморфный нанодисперсный диоксид кремния, широко применяемый в различных отраслях промышленности.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (FWFN(0205)-2025-0002, тема 2). Элементный и рентгенофазовый анализ выполнен на оборудовании ЦКП Дальневосточный центр структурных исследований ИХ ДВО РАН. Анализ распределения частиц исследуемых материалов по размеру выполнен в Центре компетенций в области испытаний материалов ДВФУ.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутинцева Е.С., Усольцева И.О., Передерин Ю.В. Способы получения высокодисперсного диоксида кремния // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 188–193.
2. Akcil A., Karshigina Z.B., Bochevskaya Ye.G., Abisheva Z.S. Conditions of nitric acid treatment of phosphorus slag for remn recovery and production of precipitated silicon dioxide // Complex Use of Mineral Resources 2018. №2. P.28–38.
3. Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Крысенко Г.Ф., Пашина Е.В., Жевтун И.Г., Козин А.В. Переработка флюоритсодержащего минерального

сырья и отходов Ярославского горно-обогатительного комбината: монография. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2018. 115 с.

4. *Тимоцук О.А., Щелокова Е.А., Касиков А.Г.* Влияние условий получения аморфного кремнезема золь-гель методом на его свойства // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. №1 (3). С.368–375.

5. Пат. 2170211 Российская Федерация, МПК C01B33/142, C01F7/26. Способ переработки кремнеземсодержащего сырья / Б.М. Душанин, М.Г. Воробьева, В. Ким, Б.С. Лисюк, О.А. Синегрибова, А.Е. Рябцев. – № 2000118091/12; заявл. 11.07.2000 ; опубл. 10.07.01.

6. Пат. 2324654 Российская Федерация, МПК C01F11/46, B03D1/02. Способ переработки гипсосодержащего сырья / В.С. Семлев, В.А. Рейтров, Н.Б. Кондриков. – № 2006127319/15; заявл. 27.07.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.

7. *Киндалюк Е.Г., Семлёв В.С., Кондриков Н.Б., Рейтров В.А.* Выщелачивание шламов борогипса // Сб. научн. трудов 4-го Международного Симпозиума «Химия и химическое образование», г. Владивосток, 16–19 мая 2007 г. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 2007. С. 182.

8. *Патеюк С.А., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В.* Научное обоснование и разработка технологии переработки отходов производства борной кислоты и комплексности использования минерального сырья : монография. Чита: ЗабГУ, 2022. 194 с.

9. *Хатькова А. Н., Шумилова Л. В., Патеюк С. А.* Разработка безотходной технологии переработки минерального сырья, расширяющая функциональные возможности горно-экологической концепции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 51–61.

10. *Гордиенко П.С., Пашина Е.В., Ярусова С.Б., Жевтун И.Г., Шабалин И.А.* Способ получения белой сажи из отходов борного производства // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Социально-экономическое развитие моногородов: традиции и инновации», г. Дальнегорск, 26–27 мая 2016 г. Владивосток: ДВФУ, 2016. С. 43–48.

11. *Пат. 2375305* Российская Федерация, МПК C01B 35/00, C01B 33/12, C01F 11/22. Способ переработки боросиликатных концентратов / *Д.Г. Эпов, Г.Ф. Крысенко, М.А. Медков, А.И. Вовна.* – № 2008119381/15; заявл. 16.05.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34.

12. *Гордиенко П.С., Крысенко Г.Ф., Ярусова С.Б., Медков М.А., Буравлев И.Ю., Курявый В.Г., Шлык Д.Х., Буравлева А.А.* Получение «белой сажи» из отходов борного производства // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». Екатеринбург: УрО РАН, 2021. С.183–186.

13. *Раков Э.Г.* Фториды аммония. Сер.: Итоги науки и техники. Неорганическая химия. Т. 15. М.: ВИНИТИ, 1988. 154 с.
14. *Zulkifli N. S. C., Ab Rahman I., Mohamad D., Husein A.* A green sol-gel route for the synthesis of structurally controlled silica particles from rice husk for dental composite filler // Ceramics International. 2013. 39(4). P.4559–4567.
15. *Li Z., Sellaoui L., Gueddida S., Dotto G.L., Lamine A.B., Bonilla-Petriciolet A., Badawi M.* Adsorption of methylene blue on silica nanoparticles: Modelling analysis of the adsorption mechanism via a double layer model // Journal of Molecular Liquids. 2020. Vol. 319. 114348.
16. *Peresa E.C., Slaviero J.C., Cunha A.M., Hosseini-Bandegharaei A., Dotto G.L.* Microwave synthesis of silica nanoparticles and its application for methylene blue adsorption // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol.6. P. 649–659.
17. *Al-Qodah Z., Lafti W.K., Al-Anber Z., Al-Shannag M., Harahsheh A.* Adsorption of methylene blue by acid and heat treated diatomaceous silica // Desalination. 2007. Vol.217. P. 212–224.
18. *Zhao M., Tang Z., Liu P.* Removal of methylene blue from aqueous solution with silica nano-sheets derived from vermiculite // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol.158. P.43–51.
19. *Kittappa S., Pichiah S., Kim J.R., Yoon Y., Snyder S.A., Jang M.* Magnetised nanocomposite mesoporous silica and its application for effective

removal of methylene blue from aqueous solution // Separation and Purification Technology. 2015. Vol.153. P. 67–75. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.019

20. *Sheng L., Zhang Y., Tang F., Liu S.* Mesoporous/microporous silica materials: Preparation from natural sands and highly efficient fixed-bed adsorption of methylene blue in wastewater // Microporous and Mesoporous Materials. 2018. Vol.257. P. 9–18.

21. *Usgodaarachchi L., Thambiliyagodage C., Wijesekera R., Bakker M.G.* Synthesis of mesoporous silica nanoparticles derived from rice husk and surface-controlled amine functionalization for efficient adsorption of methylene blue from aqueous solution // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. 2021. Vol.4. 100116.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Дифрактограммы образцов, полученных из борогипса: а –  $\text{SiO}_2$  (раствор); б –  $\text{SiO}_2$  (возгон)

**Рис.2.** ИК спектры образцов (\* – пики вазелинового масла): а –  $\text{SiO}_2$  (раствор); б –  $\text{SiO}_2$  (возгон)

**Рис. 3.** СЭМ-изображения образцов, полученных из борогипса: а, а\* –  $\text{SiO}_2$  (раствор); б, б\* –  $\text{SiO}_2$  (возгон)

**Рис.4.** Гранулометрический состав порошковой фракции диоксида кремния, полученного из отходов борного производства

**Рис. 5.** Изотерма сорбции МС образцом  $\text{SiO}_2$  (возгон)

**Рис. 6.** Кинетическая кривая сорбции МС

Таблица 1.

Содержание основных элементов, масс. %, в исследуемых образцах

Образец	Si	Fe	Содержание основного компонента (в пересчете на $\text{SiO}_2$ ), масс. %	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
$\text{SiO}_2$ (раствор)	92,1	2,2	97,6	199,0
$\text{SiO}_2$ (возгон)	97,9	1,3	99,4	98,6
Диоксид кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ГОСТ 4214–78	99,93	—	99,98	—

Таблица 2.

Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха при сорбции диоксидом кремния из борогипса

Параметры уравнения Ленгмюра			Параметры уравнения Фрейндлиха		
$A_m$ , $\text{ммоль}\cdot\text{г}^{-1}$	$k$ , $\text{л}\cdot\text{ммоль}^{-1}$	$R^2$	$K_F$ , $\text{ммоль}/\text{г}\cdot(\text{л}/\text{ммоль})^{1/n}$	$1/n$	$R^2$
0,031	0,916	0,9964	65,4	0,7274	0,9886

Таблица 3.

Результаты обработки кинетической кривой адсорбции МС «белой сажей»

моделями химической кинетики

Кинетическая модель			
Псевдопервого порядка		Псевдовторого порядка	
$k_1 \cdot 10^{-2}$ , мин <sup>-1</sup>	$R^2$	$k_2 \cdot 10^{-2}$ , г·ммоль <sup>-1</sup> ·мин <sup>-1</sup>	$R^2$
2,97	0,9962	5,8	0,9501