

Торф и продукты его переработки

УДК 544.723.23

СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ И ИХ НАТРИЕВЫХ СОЛЕЙ В ОТНОШЕНИИ ИОНОВ Cd^{2+}

© Т.А. Корельская, Е.А. Журавлева, Е.А. Айвазова, Н.А. Онохина*, Н.А. Зубова

Северный государственный медицинский университет, пр. Троицкий, 51,
Архангельск, 163069 (Россия), e-mail: onohina.76@mail.ru

В работе приведен анализ сорбционных свойств гуминовых кислот и их натриевых солей, выделенных из верхнего торфа Архангельской области, по отношению к ионам Cd^{2+} при различных значениях pH. С помощью изотерм адсорбции рассчитана объемная емкость исследуемых препаратов. Для количественной оценки сорбционной способности препаратов использовали математические модели Лэнгмюра и Фрейндлиха. Расчет математических моделей сорбции Лэнгмюра и Фрейндлиха, а также статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office for Windows, Excel, 2016. Проведена оценка прочности связей между сорбентом и сорбтивом с помощью коэффициента связывания, а также оценка предельной адсорбции для гуминовых и кислот и их натриевых солей. Приведена оценка скорости связывания ионов кадмия различными сорбентами и определены pH, при которых сорбционная емкость гуминовых кислот и их натриевых солей является максимальной. Представлены структурно-функциональные особенности гуминовых кислот, доказывающие их высокую связывающую способность и прочность связывания Cd^{2+} , а также относительно высокую селективность. На основании полученных результатов предполагается возможность разработки и применения препаратов на основе гуминовых кислот в качестве сорбентов.

Ключевые слова: гуминовые кислоты, гуматы натрия, токсиканты, адсорбционные эффекты, степень извлечения.

Введение

С ухудшением экологического состояния окружающей среды возрастает поступление и отрицательное воздействие на организм человека различных поллютантов, например, таких как тяжелые металлы [1, 2], к которым относятся ионы свинца, кадмия, ртути, меди, мышьяка. Загрязнение окружающей среды кадмием – одним из самых токсичных металлов (относится к 1 классу опасности) – оказывает значимое отрицательное влияние на состояние здоровья населения.

Кадмий негативно воздействует на печень, почки, центральную нервную систему, нарушает фосфорно-кальциевый обмен, является сильным канцерогеном и имеет отчетливую тенденцию к накоплению в организме – период его полувыведения составляет 10–35 лет [3–5]. В небольших количествах кадмий попа-

Корельская Татьяна Александровна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры общей и биоорганической химии, e-mail: takorelskaya@yandex.ru

Журавлева Екатерина Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры общей и биоорганической химии, e-mail: zhuravleva.ek20@yandex.ru

Айвазова Елена Анатольевна – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой общей и биоорганической химии, e-mail: ayvazowa@yandex.ru

Онохина Наталья Александровна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры общей и биоорганической химии, e-mail: onohina.76@mail.ru

Зубова Наталья Александровна – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры общей и биоорганической химии, e-mail: natalja.matonina@yandex.ru

дает в организм человека с табачным дымом, продуктами питания растительного происхождения (грибы, семечки подсолнечника, зерновые, пшеница, орехи). Загрязнение воздуха и природных вод кадмием может происходить в результате поступления продуктов сгорания угля, дизельного топлива, гальванических, стекольных и цементных производств [6]. В связи с этим происходит увеличение потребности общества в использовании различных видов сорбционных материалов. Возникает необходимость сорбционной очистки воздуха и промышленных вод, санации почв и почвогрунтов и, конечно, остро стоит вопрос разработки эф-

* Автор, с которым следует вести переписку.

фективных энтеросорбентов. При разработке данных препаратов должное внимание уделяется определению сорбционной емкости компонентов по отношению к различным токсикантам. Проведено немало исследований, касающихся изучения сорбционной способности гуминовых кислот различного происхождения по отношению к ионам тяжелых металлов [7–14], в том числе ионов кадмия [15, 16].

В Архангельской области сосредоточено около 25% всего торфяного фонда европейской части России [17]. Поэтому важно оценить возможность использования верхового торфа, представляющего собой дешевый возобновляемый ресурс, в качестве потенциального источника выделения таких биополимеров, как гуминовые кислоты и получения на их основе эффективного природного сорбента. Благодаря особенностям структурно-функционального состава эти соединения могут эффективно поглощать не только органические токсиканты, но и неорганические поллютанты, такие как тяжелые металлы. Именно поэтому цель данной работы – исследование сорбционных свойств непосредственно препаратов гуминовых кислот, выделенных из торфа, и их солей в отношении ионов Cd^{2+} .

Экспериментальная часть

В ходе работы были проведены исследования сорбционных свойств гуминовых кислот (ГК) и гуматов натрия (ГNa) по отношению к ионам кадмия. Образцы ГК выделяли из образцов верхового торфа, отобранного на территории Архангельской области, с использованием общепринятой методики [18]. Для определения сорбционной способности брали навески ГК и ГNa в 0.100 ± 0.001 г, помещали в конические колбы с притертыми пробками и добавляли в каждую по 40 мл стандартных растворов с исходными концентрациями в диапазоне от 2 до 400 мкг Cd^{2+} /мл. Эксперимент проводился в четырех сериях при значениях pH от 3 до 6. Необходимые значения pH создавали, добавляя в стандартные растворы 2N H_2SO_4 . Полученные системы встряхивали с малой интенсивностью в течение 40 мин. После этого содержимое колб отфильтровывали. Уровень кислотности и равновесную концентрацию Cd^{2+} в растворе определяли потенциометрическим методом с использованием иономера «Эксперт-001» с электродами стеклянным комбинированным ЭСК-10603 и ионоселективным ЭЛИС – 131 Cd соответственно.

Обсуждение результатов

В ходе исследования была проведена оценка адсорбционных эффектов ГК и ГNa при значениях pH=3–6 в отношении Cd^{2+} .

Степень извлечения ионов Cd^{2+} из растворов оценивали по формуле (рис. 1.)

$$\alpha = \frac{C_{исх} - C_{равн}}{C_{исх}}$$

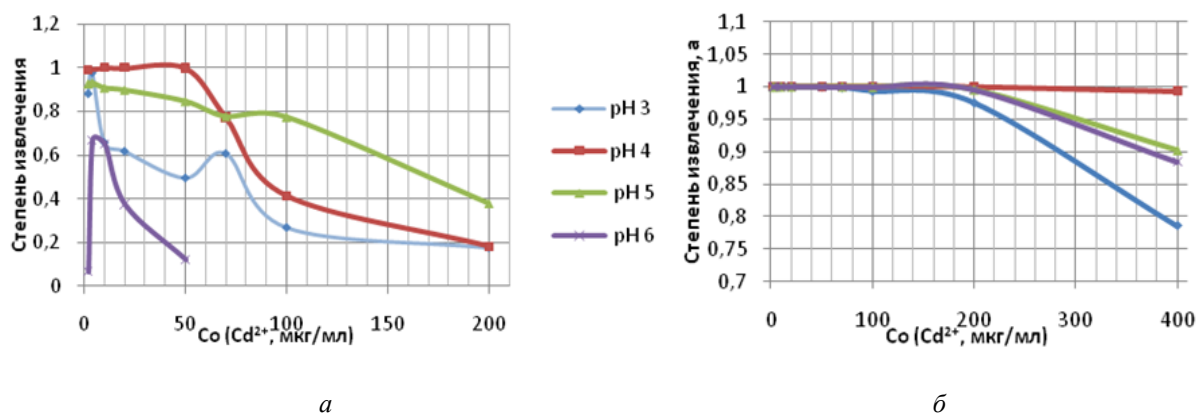


Рис. 1. Зависимость степени извлечения препаратами ГК (а) и ГNa (б) от исходной концентрации Cd^{2+} при разных значениях pH

Наибольшая степень извлечения ионов кадмия при всех значениях pH, независимо от исходной концентрации, отмечается для препаратов ГNa и во всех растворах приближается к 100%, в отличие от значений α , определенных для препаратов ГК. Стоит отметить стабильно высокую степень извлечения изучаемых ионов в растворах всех концентраций обоими препаратами при pH=4. Для модельных растворов с другими значениями pH при увеличении вносимой концентрации Cd^{2+} степень их извлечения снижается, наиболее резкое падение значений α характерно для препаратов ГК в сравнении ГNa. Видимо, это связано с уменьшением способности ГК, являющимися слабыми кислотами, к взаимодействию с ионами кадмия, в отличие от ГNa, быстрым заполнением сорбционных центров с использованием дативного механизма взаимодействия функциональных групп с ионами Cd^{2+} . В то время как ГNa, являясь сильными электролитами, обеспечивают высокую степень извлечения Cd^{2+} из растворов при всех значениях концентраций модельных растворов, посредством, прежде всего, более высокой способности к образованию комплексных соединений.

Сорбционные свойства исследуемых препаратов можно оценить на основе анализа изотерм сорбции, характеризующих зависимость сорбционной способности от концентрации Cd^{2+} при постоянной температуре (рис. 2). Количественно адсорбция (Γ) определяется избытком вещества на границе фаз по сравнению с равновесной концентрацией данного вещества в растворе. Используя величины исходной $C_{исх}$ и остаточной $C_{ост}$ концентраций ионов Cd^{2+} растворах с учетом массы сорбента и объема сорбтива, рассчитывали статическую обменную емкость исследуемых препаратов (мг Cd^{2+} /г сорбента) по формуле

$$\Gamma = \frac{(C_{исх} - C_{ост}) \cdot V}{m}$$

где $C_{исх}$ – концентрация Cd^{2+} до сорбции мкг/мл; $C_{ост}$ – концентрация Cd^{2+} после сорбции мкг/мл; V – объем раствора из которого проводили сорбцию, л; m – масса сорбента, г.

Вид сорбционных кривых ГNa при всех значениях pH в большей степени отвечает классическим представлениям о процессе мономолекулярной адсорбции на поверхности сорбента. Согласно расчетам, емкость насыщения ГNa при всех значениях pH превышает данную величину ГК в среднем в 5–10 раз.

Для количественной оценки сорбционной способности препаратов использовали математические модели Лэнгмюра и Фрейндлиха.

Расчет математических моделей сорбции Лэнгмюра и Фрейндлиха, а также статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office for Windows, Excel, 2016.

Модель сорбции Лэнгмюра позволяет описать процессы сорбции веществ на одинарном гомогенном слое сорбента, т.е. на поверхности сорбента образуется мономолекулярный слой адсорбата, а все активные центры обладают равной энергией и энтальпией. Линейная форма уравнения Ленгмюра имеет вид

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{np}} + \frac{1}{\Gamma_{np} \cdot \beta} \cdot \frac{1}{C}$$

где Γ_{np} (предельная адсорбция) и β (коэффициент определяющий сродство сорбента к сорбтиву) – константы уравнения Ленгмюра, которые были рассчитаны из наклона и пересечения прямых на графиках в соответствующих координатах линейных уравнений (рис. 3–5).

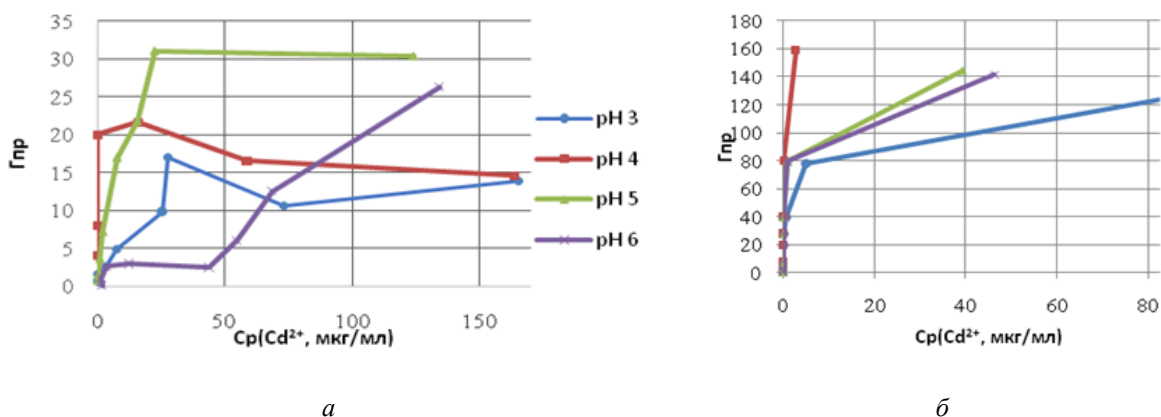
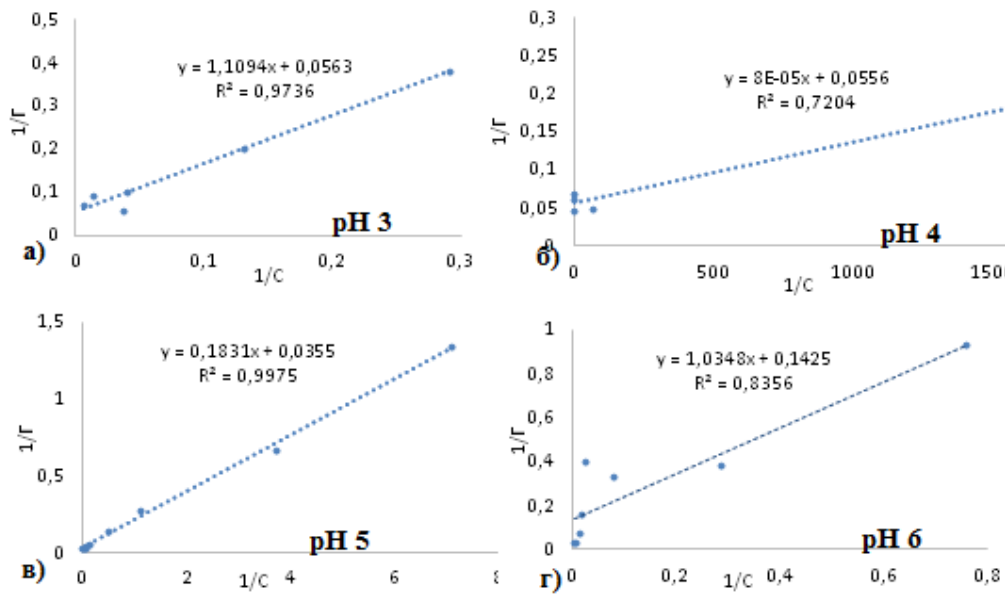
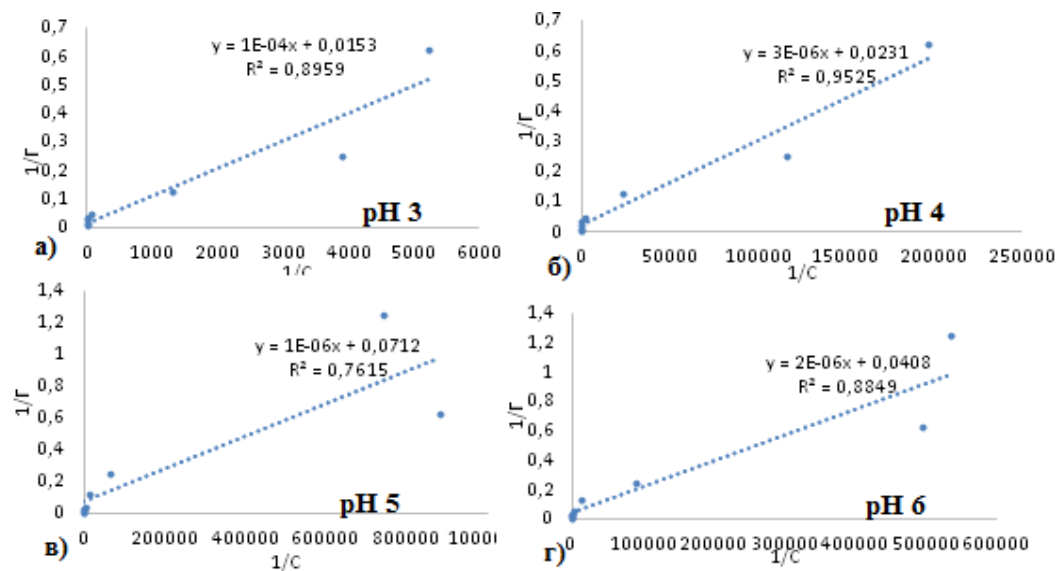
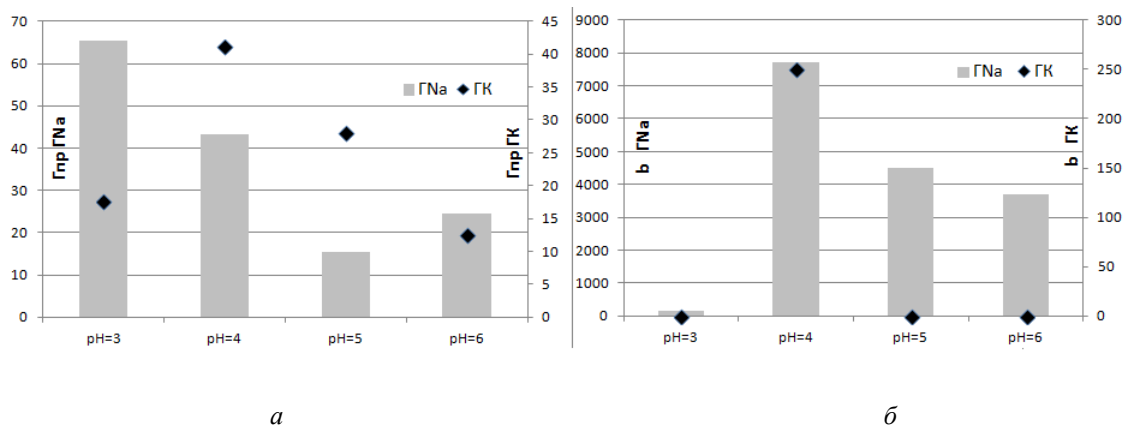


Рис. 2. Сорбционные кривые ГК (а) и ГNa (б) при различных значениях pH

Рис. 3. Изотермы Ленгмюра адсорбции Cd²⁺ ГК при разных значениях pHРис. 4. Изотермы Ленгмюра адсорбции Cd²⁺ ΓNa при разных значениях pHРис. 5. Зависимость $\Gamma_{пр}$ (а) и β (б) от значений pH модельных растворов

Из рисунков 3 и 4 следует, что линейаризация экспериментальных данных адсорбции ионов Cd^{2+} исследуемыми препаратами обеспечивается в различных диапазонах равновесных концентраций. Для ГК при pH 3 и 4 – это 2–165 мг/л и 0.1 – 325 мг/л при pH 5 и 6. Для ГNa линейная зависимость выполняется в диапазонах значительно меньших концентраций при всех значениях pH и составляет $2 \cdot 10^{-4}$ –85 мг/л при pH 3 и $2 \cdot 10^{-6}$ –40 мг/л при остальных значениях pH.

Уравнение изотермы модели Фрейндлиха $\lg \Gamma = \lg K_F + 1/n \cdot \lg C_p$ используется для описания адсорбции на гетерогенном слое сорбента с неопределенным количеством активных центров связывания. Так как адсорбционные центры по этой модели обладают различными величинами энергии, то в первую очередь происходит заполнение активных сорбционных центров с максимальной энергией. На рисунках 6–8 представлены экспериментальные данные по адсорбции ионов Cd^{2+} на исследуемых образцах сорбентов.

Коэффициент связывающей емкости (K_F) позволяет оценить прочность связей между сорбентом и сорбтивом; n – коэффициент интенсивности сорбции, указывающий на скорость протекания процесса.

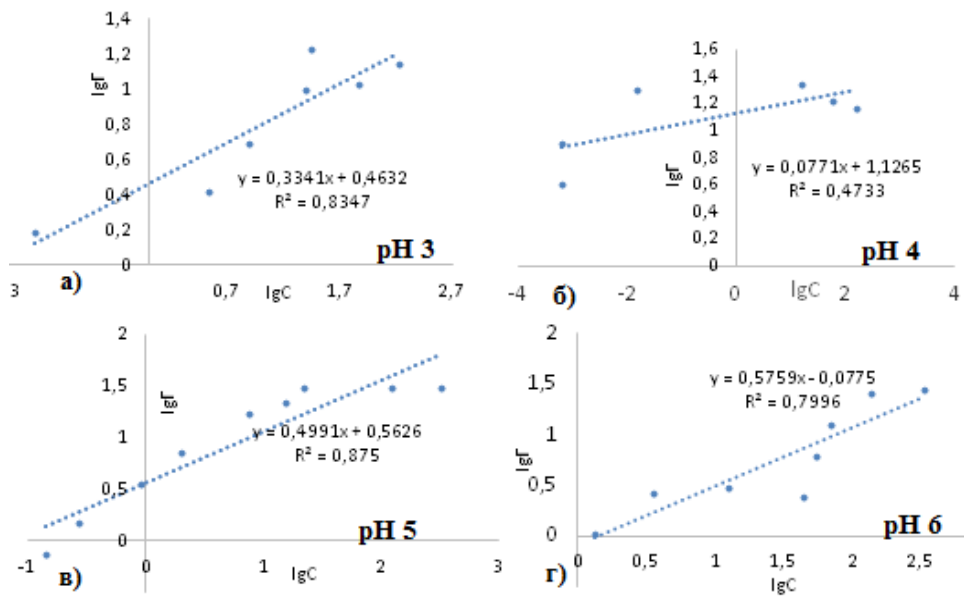


Рис. 6. Изотермы Фрейндлиха адсорбции Cd^{2+} ГК при разных значениях pH

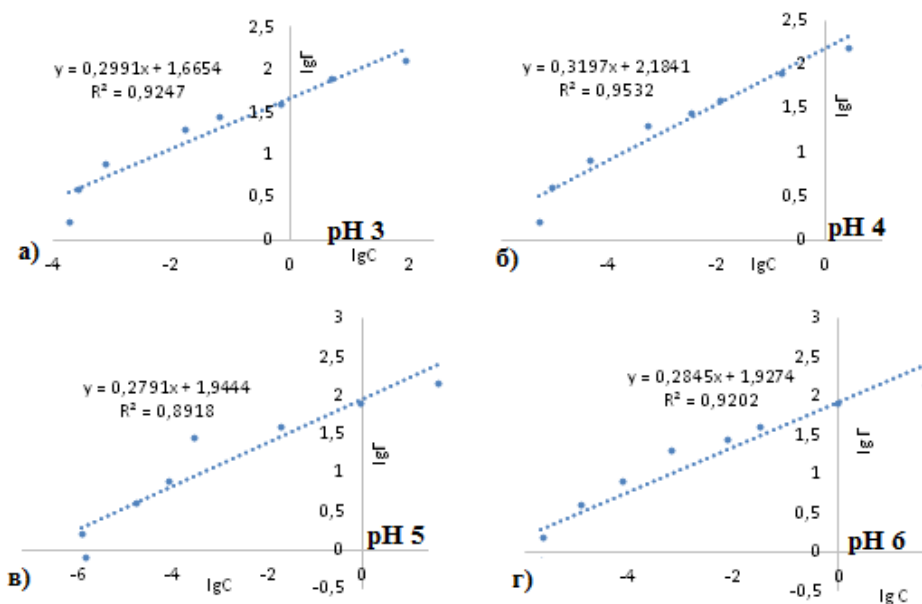


Рис. 7. Изотермы Фрейндлиха адсорбции Cd^{2+} ГNa при разных значениях pH

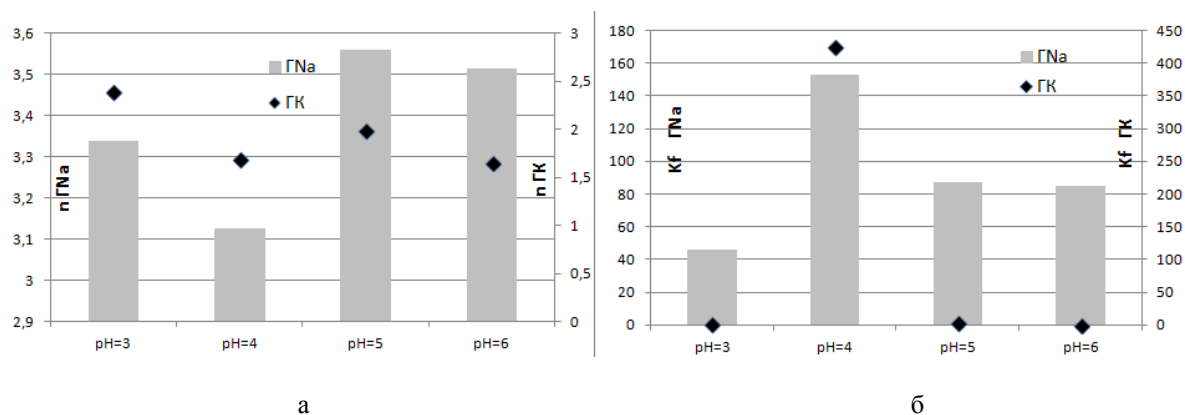


Рис. 8. Зависимость n (а) и K_f (б) от значений pH модельных растворов

В целом для изученных препаратов отмечается уменьшение $\Gamma_{пр}$ с увеличением значения pH модельного раствора.

В большинстве случаев для ГNa отмечается более высокая степень связывания ионов кадмия из растворов, чем для ГК. Вероятно, это связано с наличием большего количества свободных заряженных группировок, прежде всего карбоксильных групп, диссоциирующих при разных значениях pH. Максимальная сорбционная емкость ГNa определена при pH 3, хотя в этих же условиях предельная адсорбция ГК значительно снижена, так как в сильноокислой среде последние образуют водонерастворимую фазу в виде коллоидов, которые коагулируют с образованием гелеобразных осадков. Значения pH около 3 соответствуют точке, при которой происходит необратимое коагулирование коллоидов и полимеризация молекул гуминовых кислот. При этом блокируются их реакционные центры, резко снижается площадь поверхности раздела фаз и падает их физико-химическая и биологическая активность [19].

В случае использования ГNa в качестве сорбентов, несмотря на то, что равновесие в сильноокислой среде также будет смещаться в сторону образования слабой кислоты: $\text{ГNa} + \text{H}^+ = \text{ГК} + \text{Na}^+$. При этом возрастает доля фонового электролита в растворе, который влияет на величину кажущейся константы ионизации карбоксильных групп, смещая ее величину в более кислую область. Таким образом, в сильноокислой среде препараты ГNa обеспечивают присутствие большего количества заряженных анионных функциональных групп, способных к хелатированию, чем в случае с нативной ГК.

В целом для изученных препаратов отмечается уменьшение $\Gamma_{пр}$ с увеличением значения pH модельного раствора. Сорбционная способность Cd^{2+} , как и других ионов, сильно зависит от их ионного потенциала. Чем выше величина ионного потенциала иона, тем выше его склонность к комплексообразованию с ГК [20]. Снижение кислотности среды от 3 до 6, вероятно, влечет увеличение интенсивности гидратирования ионов Cd^{2+} и, как следствие, уменьшение ионного потенциала. Происходит снижение связывания их препаратами ГК и ГNa.

Сорбционная емкость ГК достигает максимального значения при pH 4 и соответствует уровню $\Gamma_{пр}$ ГNa в данных условиях.

Незначительное увеличение $\Gamma_{пр}$ ГNa в слабокислой среде (pH 6), возможно, происходит за счет вовлечения в процесс химической сорбции функциональных групп, проявляющих меньшие кислотные свойства, например, карбоксильных групп, сопряженных с сильными электронодонорными группировками, такими как $-\text{NH}_2$ или $-\text{OH}$.

Все вышеперечисленные факторы влияют также на сродство и прочность связывания ионов сорбентом, максимальные значения данных показателей в отношении Cd^{2+} отмечаются при pH 4 для обоих препаратов (рис. 5б, 8б).

Скорость связывания ионов кадмия с ростом pH меняется незначительно и составляет 1.7–2.4 и 3.1–3.6 для ГК и ГNa соответственно (рис 8а). Увеличение интенсивности сорбции Cd^{2+} препаратами ГNa в 1.5–1.8 раза по сравнению с ГК является результатом наличия большего количества активных центров связывания в препаратах солей и меньшей конкуренции Cd^{2+} и H^+ в растворе.

Выводы

Препараты ГNa, в отличие от ГК, обладают большей степенью извлечения ионов кадмия при всех значениях pH.

Предельная адсорбция ГNa при всех значениях pH превышает данную величину ГК в среднем в 5–10 раз. Для изученных препаратов отмечается уменьшение $\Gamma_{пр}$ с увеличением значения pH модельного раствора. Препараты ГNa имеют более высокую степень связывания ионов кадмия из растворов, чем ГК.

Максимальные значения показателей прочности связывания ионов Cd^{2+} сорбентом отмечаются при pH 4 для обоих препаратов.

Скорость связывания ионов кадмия с ростом pH меняется незначительно и составляет 1.7–2.4 и 3.1–3.6 для ГК и ГNa соответственно.

Полученные в работе результаты подтверждают многочисленные публикации хорошей сорбционной способности гуминовых кислот в отношении неорганических поллютантов, в том числе и кадмия. Это позволит расширить спектр использования препаратов-энтеросорбентов, основным действующим веществом которых являются гуминовые кислоты.

Список литературы

1. Магомедова З.Н., Мусиев Д.Р. Влияние тяжелых металлов на экологию окружающей среды и здоровье человека и животных // Современные проблемы АПК и перспективы его развития: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Махачкала, 2017. С. 195–199.
2. Грищенко И.И., Зорькина А.В., Басенко И.Н., Якимова К.А., Минаков Г.Р., Соловьев Е.Б., Евтушенко О.В., Минаков Д.Р. Гигиеническая оценка распределения тяжелых металлов в почвах техногенного региона // Университетская клиника. 2017. №4-1. С. 42–46.
3. Фазлыева А.С., Даукаев Р.А., Каримов Д.О. Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов // Медицина труда и экология человека. 2022. №1. С. 220–235.
4. Штанько Д.С., Кинжаев Д.А., Чвякин В.А. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения: обзор // Инновационные научные исследования. 2022. №4-2. С. 16–22.
5. Ахметова Э.И. Загрязнение кадмием атмосферного воздуха и его влияние на заболеваемость раком молочной железы // Неделя науки. Ставрополь, 2019. С. 531–532.
6. Крайнов П.Е. Влияние соединений кадмия на организм человека // Современные наукоемкие технологии. 2014. №5-2. С. 102–103.
7. Сартаков М.П., Якубенюк С.А., Якубенюк А.А., Шпынова Н.В. О возможности применения гуминовых кислот в качестве сорбентов и их диаграммы адсорбции // Образование, наука и техника: XXI век: сборник научных статей. Ханты-Мансийск, 2011. Т. 9. С. 44–48.
8. Сартаков М.П. Адсорбционная способность гуминовых кислот торфов среднего приобья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. №4. С. 60–64.
9. Переломов М.В., Атрощенко Ю.М., Грачёва К.А. Адсорбция тяжелых металлов модифицированными гуминовыми кислотами // Modern Science. 2020. №2. С. 19–23.
10. Зыкова И.В., Исаков В.А. Адсорбция ионов меди (II) и свинца (II) гуминовыми кислотами, выделенными из избыточного активного ила // Наукосфера. 2021. №9-2. С. 87–91.
11. Зыкова И.В., Исаков В.А. Адсорбция ионов хрома (III) и никеля (II) гуминовыми кислотами, выделенными из избыточного активного ила // Наукосфера. 2021. №9-2. С. 92–96.
12. Федорова А.А., Соколова И.В., Селянина С.Б. Адсорбция органических соединений на гуминовых кислотах // Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: материалы IV международной научной конференции. Томск, 2021. С. 126–127.
13. Маслов С.Г., Тарновская Л.И. Термодинамика адсорбции соединений на гуминовых кислотах // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №1. С. 98–102.
14. Переломов Л.В., Пинский Д.А., Переломова И.В., Атрощенко Ю.М. Адсорбционная способность природных и окисленных гуминовых кислот низинного торфа по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 2019. №2. С. 66–74.
15. Зеленцов В.И., Дацко Т.Я. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия – фтор // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48(6). С. 65–73.
16. Портнова А.В., Вольхин В.В. Имобилизация ионов меди (II) гуминовой кислотой, переведенной в малорастворимое состояние // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. №4. С. 71–75.
17. Кузнецова И.А., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А., Паламарчук И.А., Бровко О.С. Сорбционные свойства и модификация торфяных гуминовых кислот // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. 2013. №1. С. 37–42.
18. Когут Б.М., Кононова М.М., Титова Н.А., Дьяконова К.В., Александрова И.В. Учение о гумусе // Гуминовые вещества в биосфере: тезисы докладов III Всероссийской конференции. СПб., 2005. С. 13–16.

19. Мирошниченко Ю.С., Мясоедова Т.Н., Гаджиева В.А. Гуминовые вещества: строение и детоксицирующая способность // Актуальные научные и научно-технические проблемы обеспечения химической безопасности России: материалы конференции. М., 2016. С. 218.
20. Сосновская Н.Г. Бородкина В.А., Истомина Н.В., Добрынина Н.И. Сорбция тяжелых металлов гуминовой кислотой // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2013. Т. 1. №1. С. 125–130.

Поступила в редакцию 23 мая 2022 г.

После переработки 31 октября 2022 г.

Принята к публикации 1 ноября 2022 г.

Для цитирования: Корельская Т.А., Журавлева Е.А., Айвазова Е.А., Онохина Н.А., Зубова Н.А. Сорбционная способность образцов гуминовых кислот и их натриевых солей в отношении ионов Cd^{2+} // Химия растительного сырья. 2023. №1. С. 333–341. DOI: 10.14258/jcprgm.20230111391.

Korel'skaya T.A., Zhuravleva Ye.A., Ayvazova Ye.A., Onokhina N.A. , Zubova N.A. SORPTION ABILITY OF SAMPLES OF HUMIC ACIDS AND THEIR SODIUM SALTS WITH RESPECT TO Cd^{2+} IONS*

Northern State Medical University, pr. Troitsky, 51, Arkhangelsk, 163069 (Russia), e-mail: onokhina.76@mail.ru

The paper presents an analysis of the sorption properties of humic acids and their sodium salts isolated from high-moor peat of the Arkhangelsk region with respect to Cd^{2+} ions at various pH values. Using adsorption isotherms, the volumetric capacity of the studied preparations was calculated. Langmuir and Freundlich mathematical models were used to quantify the sorption capacity of preparations. Calculation of mathematical models of Langmuir and Freundlich sorption, as well as statistical data processing was carried out using Microsoft Office for Windows, Excel, 2016 software. their sodium salts. An estimate of the rate of binding of cadmium ions by various sorbents is given, and the pH at which the sorption capacity of humic acids and their sodium salts is maximum is determined. The structural and functional features of humic acids are presented, proving their high binding capacity and strength of Cd^{2+} binding, as well as relatively high selectivity. Based on the results obtained, it is assumed that it is possible to develop and use preparations based on humic acids as sorbents.

Keywords: humic acids, sorbents, sorptive, toxicants, adsorption effects, degree of extraction.

* Corresponding author.

References

1. Magomedova Z.N., Musiyev D.R. *Sovremennyye problemy APK i perspektivy yego razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Vse-rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. [Modern problems of the agro-industrial complex and the prospects for its development: a collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. Makhachkala, 2017, pp. 195–199. (in Russ.).
2. Grishchenko I.I., Zor'kina A.V., Basenko I.N., Yakimova K.A., Minakov G.R., Solov'yev Ye.B., Yevtushenko O.V., Minakov D.R. *Universitetskaya klinika*, 2017, no. 4-1, pp. 42–46. (in Russ.).
3. Fazlyyeva A.S., Daukayev R.A., Karimov D.O. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*, 2022, no. 1, pp. 220–235. (in Russ.).
4. Shtan'ko D.S., Kinzhayev D.A., Chvyakin V.A. *Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya*, 2022, no. 4-2, pp. 16–22. (in Russ.).
5. Akhmetova E.I. *Nedelya nauki*. [Week of Science]. Stavropol', 2019, pp. 531–532. (in Russ.).
6. Kraynov P.Ye. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, 2014, no. 5-2, pp. 102–103. (in Russ.).
7. Sartakov M.P., Yakubenyuk S.A., Yakubenyuk A.A., Shpynova N.V. *Obrazovaniye, nauka i tekhnika: XXI vek: sbornik nauchnykh statey*. [Education, science and technology: XXI century: collection of scientific articles]. Khanty-Mansiysk, 2011, vol. 9, pp. 44–48. (in Russ.).
8. Sartakov M.P. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2011, no. 4, pp. 60–64. (in Russ.).
9. Perelomov M.V., Atroshchenko Yu.M., Grachova K.A. *Modern Science*, 2020, no. 2, pp. 19–23. (in Russ.).
10. Zyкова I.V., Isakov V.A. *Naukosfera*, 2021, no. 9-2, pp. 87–91. (in Russ.).
11. Zyкова I.V., Isakov V.A. *Naukosfera*, 2021, no. 9-2, pp. 92–96. (in Russ.).
12. Fedorova A.A., Sokolova I.V., Selyanina S.B. *Torfyanyye bolota Sibiri: funktsionirovaniye, resursy, vosstanovleniye: materialy IV mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Peat bogs of Siberia: functioning, resources, restoration. Proceedings of the IV international scientific conference]. Tomsk, 2021, pp. 126–127. (in Russ.).
13. Maslov S.G., Tarnovskaya L.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, no. 1, pp. 98–102. (in Russ.).
14. Perelomov L.V., Pinskiy D.A., Perelomova I.V., Atroshchenko Yu.M. *Agrokhiimiya*, 2019, no. 2, pp. 66–74. (in Russ.).
15. Zelentsov V.I., Datsko T.Ya. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2012, vol. 48(6), pp. 65–73. (in Russ.).
16. Portnova A.V., Vol'khin V.V. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2008, no. 4, pp. 71–75.
17. Kuznetsova I.A., Bogolitsyn K.G., Boytsova T.A., Palamarchuk I.A., Brovko O.S. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta*, 2013, no. 1, pp. 37–42. (in Russ.).
18. Kogut B.M., Kononova M.M., Titova N.A., D'yakonova K.V., Aleksandrova I.V. *Guminovyye veshchestva v biosfere: tezisyy dokladov III Vserossiyskoy konferentsii*. [Humic substances in the biosphere: abstracts of the III All-Russian Conference]. St. Petersburg, 2005, pp. 13–16. (in Russ.).
19. Miroshnichenko Yu.S., Myasoyedova T.N., Gadzhayeva V.A. *Aktual'nyye nauchnyye i nauchno-tekhnicheskiye problemy obespecheniya khimicheskoy bezopasnosti Rossii: materialy konferentsii*. [Actual scientific and scientific-technical problems of ensuring chemical safety in Russia: conference materials]. Moscow, 2016, p. 218. (in Russ.).
20. Sosnovskaya N.G., Borodkina V.A., Istomina N.V., Dobrynina N.I. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 125–130. (in Russ.).

Received May 23, 2022

Revised October 31, 2022

Accepted November 1, 2022

For citing: Korel'skaya T.A., Zhuravleva Ye.A., Ayvazova Ye.A., Onokhina N.A., Zubova N.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 1, pp. 333–341. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcpr.20230111391.

