

# Аналитические обзоры по процессам адсорбции

## Аннотации и оглавления

<b>1. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами .....</b>	<b>4</b>
2.1. Кадмий .....	4
2.2. Медь .....	6
2.3. Цинк .....	7
2.4. Свинец .....	9
2.5. Стронций .....	11
2.6. Уран .....	13
<b>3. Поведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Трансформация, адсорбция/десорбция, миграция .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов .....</b>	<b>18</b>

Обзоры рассчитаны на специалистов, занимающихся изучением и моделированием процессов загрязнения зоны аэрации и подземных вод тяжелыми металлами и другими токсичными элементами, и публикуются в серии «Экология», издаваемой ГПНТБ СО РАН (<http://www.spsl.nsc.ru/win/ecol/izdano-new.html>). Изданные обзоры можно заказать по электронной почте в электронной и/или бумажной форме.

# **1. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции**

*Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. – 155 с. – Библиогр.: С. 138–152 (245 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 90).

Данная работа – первый в России аналитический обзор, посвященный изучению поведения металлов в системе вода–порода. Рассматриваются механизмы и условия поглощения металлов (Cd, Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Cr, As, Hg, Se, Ag), их десорбция и миграция с инфильтрующимися атмосферными осадками, что создает опасность загрязнения подземных вод. Изучены состав и характеристика твердой фазы природных сорбентов (почвенных и минеральных) в системе вода–порода, сорбционная способность различных гранулометрических фракций, литологические свойства почв и пород. Представлены корреляции параметров адсорбции с указанными свойствами природных сорбентов и относительная подвижность металлов.

Значительное влияние на сорбцию металлов оказывает состав жидкой фазы: рН, ионная сила, природа катионов и анионов. Представлены коэффициенты распределения металлов, уравнения регрессии и коэффициенты корреляции при адсорбции в различных условиях. Особое внимание обращено на растворенное органическое вещество в местах складирования отходов и его влияние на подвижность металлов.

Предлагаемый аналитический обзор существенно пополняет знания о закономерностях сорбции (десорбции) тяжелых металлов в различных условиях и о факторах, влияющих на величину сорбционных (десорбционных) параметров. Представленная информация будет полезна для выявления условий адсорбции металлов при обосновании выбора параметров моделирования их поведения в различных условиях в подземной гидросфере и сопредельных средах.

## **Предисловие**

### **Введение**

#### **1. Термины и обозначения**

- 1.1. Принятые обозначения
- 1.2. Классификация изотерм адсорбции
- 1.3. Уравнения адсорбции

#### **2. Характеристика сорбентов**

- 2.1. Поглощающая поверхность твердой фазы
- 2.2. Типы сорбентов и их сорбционная способность
- 2.3. Сорбционная способность различных гранулометрических фракций
- 2.4. Свойства сорбента и сравнительная подвижность металлов

#### **3. Механизмы поглощения металлов почвами и породами**

- 3.1. Поведение металлов в системе раствор–сорбент
- 3.2. Ионный обмен и осаждение
- 3.3. Специфическая адсорбция

#### **4. Конкурентная адсорбция**

- 4.1. Влияние конкуренции на сорбируемость металлов
- 4.2. Сравнение параметров сорбции отдельных металлов и конкурентной сорбции
- 4.3. Статистический анализ конкуренции металлов

- 5. Роль органического вещества в сорбции металлов**
    - 5.1. Гумусовые вещества
      - 5.1.1. *Состав и структура гумусовых соединений*
      - 5.1.2. *Взаимодействие металлов с растворенными формами гумусовых соединений*
      - 5.1.3. *Адсорбция гумусовых соединений в почве. Образование минералоорганических комплексов*
      - 5.1.4. *Коллоидная фаза гумусового вещества*
      - 5.1.5. *Твердая фаза гумусового вещества*
    - 5.2. Другие органические соединения в системе «вода–природный сорбент»
      - 5.2.1. *Природное растворенное органическое вещество*
      - 5.2.2. *Синтетические органические вещества*
      - 5.2.3. *Органическое вещество фильтратов свалок, сточных вод и компостов*
    - 5.3. Поведение тяжелых металлов в почвах и породах с высоким содержанием органического вещества
      - 5.3.1. *Влияние растворенного органического вещества фильтрата свалок*
      - 5.3.2. *Влияние обработки почв осадком сточных вод*
      - 5.3.3. *Влияние растворенного органического вещества пойменных почв, загрязненных промышленными отходами*
  - 6. Влияние pH на поведение металлов в почвах и породах**
    - 6.1. pH и адсорбция гидролизованых форм металлов
    - 6.2. pH раствора и адсорбция соединений металлов оксидами
    - 6.3. pH раствора и конкуренция ионов металлов
    - 6.4. pH фильтрата свалок и миграция металлов
    - 6.5. Совместное влияние pH и органического вещества на поведение металлов
    - 6.6. Зависимость растворимости металлов в почвенном растворе от уровня загрязнения почв и pH
  - 7. Влияние ионной силы и состава раствора на сорбцию металлов**
    - 7.1. Ионная сила и природа катионов исходного раствора
    - 7.2. Ионная сила и природа анионов исходного раствора
  - 8. Особенности сорбции металлов в известковых почвах**
  - 9. Корреляции свойств сорбента и параметров сорбции металла**
  - 10. Влияние нагрузки металла на его сорбцию**
  - 11. Миграция тяжелых металлов с инфильтрующимися водами**
- Заключение**
- Литература**

## **2. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами**

### **2.1. Кадмий**

*Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Кадмий: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2012. – 110 с. – Библиогр.: С. 4–5, 97–107 (184 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 99).

Серия аналитических обзоров «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» продолжает публикацию результатов исследования, начатого в обзоре «Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. (Сер. Экология. Вып. 90)», и посвящена изучению адсорбции / десорбции отдельных, наиболее часто встречающихся металлов-загрязнителей – кадмия, цинка, меди, свинца, стронция, урана и др. Представлены физико-химические механизмы удерживания каждого из этих элементов в твердой фазе в зависимости от природы поглотителя и водной фазы. Рассмотрены условия выщелачивания металлов в местах складирования бытовых и радиоактивных отходов, зонах загрязнения природных компонентов окружающей среды предприятиями горнодобывающей промышленности и металлургии, а также на участках применения органических отходов в качестве удобрений. Обзоры рассчитаны на специалистов, занимающихся изучением процессов загрязнения зоны аэрации и подземных вод.

Первый выпуск серии посвящен кадмию – одному из наиболее токсичных загрязнителей природной среды, который особенно трудно удаляется из природных вод, подвергшихся антропогенному воздействию.

#### **Введение**

##### **1. Термины, обозначения, изотермы**

- 1.1. Обозначения
- 1.2. Классификация изотерм адсорбции по Джайлсу
- 1.3. Уравнения изотерм адсорбции

##### **2. Основные сорбенты, механизмы и модели сорбции кадмия**

- 2.1. Оксиды железа, марганца, алюминия
- 2.2. Глинистые минералы
- 2.3. Специфическая адсорбция
- 2.4. Общая сорбция
- 2.5. Подбор уравнения изотермы адсорбции

##### **3. Влияние на сорбцию кадмия характеристик порового раствора**

- 3.1. pH
- 3.2. Ионная сила раствора и природа макрокатиона
- 3.3. Высокие концентрации кальция
- 3.4. Конкуренция с другими металлами

##### **4. Роль процессов комплексообразования в адсорбции и миграции кадмия**

- 4.1. Неорганические лиганды
- 4.2. Органические лиганды

##### **5. Влияние различных факторов на сорбцию кадмия**

- 5.1. Свойства твердой и жидкой фаз
- 5.2. Корреляционный и регрессионный анализ влияния параметров поглотителя и раствора

## **6. Десорбция кадмия**

- 6.1. Необратимость десорбции
- 6.2. Расчет  $K_d$  на основе экспериментов по десорбции
- 6.3. Корреляционный и регрессионный анализ сорбции/десорбции Cd

## **7. Антропогенные воздействия и поведение кадмия в почвах и породах**

- 7.1. Обработка почв осадком сточных вод и сорбция кадмия
- 7.2. Депонирование твердых бытовых отходов и загрязнение подземных вод
- 7.3. Изменение условий известкования почв и миграция кадмия
- 7.4. Выщелачивание кадмия из загрязненных почв и отходов различных материалов
  - 7.4.1. Потенциал выщелачивания
  - 7.4.2. Геохимическое моделирование выщелачивания кадмия
- 7.5. Атмосферные выпадения вблизи предприятий горной промышленности и миграция кадмия
  - 7.5.1. Относительное удерживание Cd в профиле почвы
  - 7.5.2. Моделирование миграции кадмия в профилях почвы

## **Заключение**

## **Литература**

## 2.2. Медь

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Медь: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. – 95 с. – Библиогр.: С. 4–5, 82–92 (187 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 100).

Второй выпуск серии «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» посвящен изучению адсорбционного/десорбционного поведения меди как одного из наиболее часто встречающихся тяжелых металлов в зонах антропогенного загрязнения. Процессы адсорбции-десорбции вносят существенный вклад в загрязнение окружающей среды, и их изучение является одной из основных задач геоэкологических исследований. Представлены механизмы удерживания меди в почвах и горных породах в зависимости от природы поглотителя и различных условий окружающей среды. Изучено влияние характеристик твердой и жидкой фаз на геохимическое поведение меди в системе вода–порода. Приводятся коэффициенты корреляции и уравнения регрессии, связывающие рассмотренные характеристики с параметрами изотерм адсорбции или с коэффициентом распределения. Рассмотрены условия выщелачивания меди в местах складирования бытовых отходов, а также на участках использования органических отходов в качестве удобрений.

Одной из практических задач настоящего аналитического обзора является получение информации для моделирования поведения меди в системе вода–порода в условиях антропогенного загрязнения.

### Введение

#### 1. Термины, обозначения, изотермы

- 1.1. Обозначения
- 1.2. Классификация изотерм адсорбции по Джайлсу
- 1.3. Уравнения изотерм адсорбции

#### 2. Геохимические фракции меди в различных поглотителях

#### 3. Подбор уравнения изотермы адсорбции и анализ его параметров

#### 4. Влияние на сорбцию меди характеристик водной и твердой фаз

- 4.1. pH
- 4.2. Макроанионы
- 4.3. Макрокатионы
- 4.4. Селективная адсорбция, коэффициент селективности
- 4.5. Конкуренция с тяжелыми металлами, влияние температуры
- 4.6. Неорганические комплексы меди

#### 5. Роль органического вещества в процессах адсорбции меди

- 5.1. Влияние растворенного органического вещества на поведение меди
  - 5.1.1. Взаимодействия меди с гумусовым веществом
  - 5.1.2. Связь общей растворимой меди с содержанием органического вещества
- 5.2. Адсорбционные свойства твердого ОВ для меди

#### 6. Корреляция сорбции меди с параметрами поглотителя и водной фазы

#### 7. Сорбция меди в условиях антропогенного загрязнения

- 7.1. Влияние органического вещества на удерживание меди в загрязненных почвах
- 7.2. Обработка почв осадком сточных вод и сорбция меди
- 7.3. Конкурентная сорбция меди в почвах, обработанных ОСВ

#### 8. Десорбция и миграция меди

- 8.1. Десорбция меди
- 8.2. Миграция меди с участков размещения осадков сточных вод

### Заключение

### Литература

## 2.3. Цинк

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Цинк: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2014. – 99 с. – Библиогр.: С. 4–5, 88–97 (176 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 102).

Четвертый выпуск серии «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» посвящен изучению адсорбционного/десорбционного поведения цинка как одного из активных микроэлементов, влияющих на рост и нормальное развитие организмов. Многие соединения цинка токсичны, прежде всего сульфат и хлорид цинка, наиболее часто встречающиеся среди соединений тяжелых металлов в зонах антропогенного загрязнения. Процессы адсорбции/десорбции вносят наиболее существенный вклад в загрязнение окружающей среды, и их изучение является одной из основных задач геоэкологических исследований. Представлены механизмы адсорбции цинка в почвах и горных породах в зависимости от природы поглотителя и различных условий окружающей среды. Изучено влияние характеристик твердой и жидкой фаз на геохимическое поведение цинка в системе вода–порода. Приводятся коэффициенты корреляции и уравнения регрессии, связывающие рассмотренные характеристики с параметрами изотерм адсорбции или с коэффициентом распределения. Рассмотрены условия выщелачивания цинка в районах промышленного загрязнения, из депонированных отходов и из почв, удобренных осадком сточных вод. Оценен потенциал выщелачивания цинка из различных материалов.

Одной из практических задач настоящего аналитического обзора является получение информации для моделирования поведения цинка в системе вода–порода в условиях антропогенного загрязнения.

### Введение

#### 1. Термины, обозначения, изотермы

- 1.1. Обозначения
- 1.2. Классификация изотерм адсорбции по Джайлсу
- 1.3. Уравнения изотерм адсорбции

#### 2. Основные механизмы и модели сорбции цинка

- 2.1. Геохимические фракции цинка в различных поглотителях
- 2.2. Подбор уравнения изотермы и использование его параметров для анализа механизмов сорбции
- 2.3. ЕКО и механизм адсорбции
- 2.4. Термодинамические характеристики процессов сорбции Zn
- 2.5. Коэффициент распределения

#### 3. Влияние характеристик водной и твердой фаз на механизмы сорбции цинка

- 3.1. pH
- 3.2. Известковые почвы
- 3.3. Конкуренция с макрокатионами
- 3.4. Природа неорганического аниона
- 3.5. Комплексообразование цинка с органическими лигандами
- 3.6. Конкуренция с тяжелыми металлами
- 3.7. Корреляционный и регрессионный анализ влияния различных факторов на сорбцию цинка

#### 4. Антропогенные воздействия и поведение цинка в почвах и породах

- 4.1. Применение осадка сточных вод и других органических удобрений
- 4.2. Депонирование твердых бытовых отходов
- 4.3. Промышленное загрязнение территорий

## **5. Выщелачивание и миграция цинка из загрязненных почв и депонированных отходов**

5.1. Миграция цинка из загрязненных почв

5.2. Потенциал выщелачивания цинка из различных материалов

5.3. Геохимическое моделирование выщелачивания цинка

**Заключение**

**Литература**



## 2.4. Свинец

*Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Свинец: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН. – подготовлен к печати.

Очередной выпуск серии «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» посвящен изучению адсорбционного/десорбционного поведения свинца как одного из микроэлементов, относящихся к группе тяжелых металлов 1-го класса опасности для окружающей среды и организма человека. Свинец – широко распространенный в природе тяжелый металл с высоким ежегодным антропогенным поступлением. По эффекту воздействия на живые организмы свинец принадлежит к биохимически активным веществам. В обзоре представлены механизмы адсорбции свинца в почвах и горных породах в зависимости от природы поглотителя и различных условий окружающей среды. Показано влияние характеристик твердой и жидкой фаз на геохимическое поведение свинца в системе вода–порода. Приводятся коэффициенты корреляции и уравнения регрессии, связывающие рассмотренные характеристики с параметрами изотерм адсорбции или с коэффициентом распределения. Рассмотрены условия десорбции и миграции свинца в районах промышленного загрязнения, из депонированных отходов и из почв, удобренных осадком сточных вод.

Одной из практических задач настоящего аналитического обзора является получение информации для моделирования поведения свинца в системе вода–порода в условиях антропогенного загрязнения.

### Введение

#### 1. Водные формы

#### 2. Механизмы адсорбции

- 2.1. Влияние рН
- 2.2. Специфическая адсорбция
- 2.3. Ионная сила

#### 3. Влияние анионов

- 3.1. Неорганические лиганды
- 3.2. Органические лиганды

#### 4. Адсорбция свинца почвами. Изотермы

- 4.1. Основные уравнения и формы изотерм
- 4.2. Построение и анализ изотерм адсорбции свинца почвами
- 4.3. Корреляция параметров изотерм адсорбции со свойствами почвы
- 4.4. Адсорбция свинца почвами в присутствии большого количества ионов кальция. Изотермы специфической адсорбции
- 4.5. Адсорбции свинца карбонатной почвой. Изотермы обмена.

#### 5. Адсорбция свинца горными породами

- 5.1. Глины
- 5.2. Оксиды железа и алюминия
- 5.3. Оксиды марганца
- 5.4. Конкурентная адсорбция тяжелых металлов на оксидах

#### 6. Влияние органического вещества в твердой фазе на адсорбцию свинца

#### 7. Сравнение адсорбционной способности различных поглотителей относительно свинца

#### 8. Антропогенное загрязнение свинцом

- 8.1. Корреляция параметров почв и пород с растворимостью свинца
- 8.2. Депонирование отходов и загрязнение тяжелыми металлами

8.3. Загрязнение почв свинцом при рудных разработках

**9. Коэффициент распределения –  $K_d$**

9.1. Корреляции и регрессионный анализ связи  $K_d$  с параметрами твердой и жидкой фазы

9.2. Компиляция значений  $K_d$

**10. Десорбция и миграция свинца**

10.1. Механизм десорбции

10.2. Зависимость десорбции от pH

10.3. Биоэкстракция

**Заключение**

**Литература**

## 2.5. Стронций

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. – 95 с. – Библиогр.: С. 5–6, 87–92 (105 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 101).

Третий выпуск серии «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» посвящен изучению адсорбционного/десорбционного поведения стронция. Радиоактивный изотоп  $^{90}\text{Sr}$  является одним из наиболее опасных продуктов деления урана и плутония. Он характеризуется высокой токсичностью из-за своей способности активно включаться в биологический круговорот веществ. Стронций является аналогом кальция и легко вступает в процессы обмена веществ животных и человека. Значительный интерес для гидрогеологов, изучающих миграцию радиоактивных отходов через подповерхностную среду, представляет геохимическое поведение стронция в зоне аэрации и водоносных горизонтах. Представлены механизмы адсорбции стронция почвами и горными породами в зависимости от природы поглотителя и различных условий окружающей среды. Изучено влияние характеристик твердой и жидкой фаз на адсорбционное поведение стронция в системе вода–порода. Представлены параметры изотерм адсорбции и коэффициенты распределения. Рассмотрены условия миграции стронция в зонах радиоактивного загрязнения. Одной из практических задач настоящего аналитического обзора является получение информации для моделирования поведения стронция в системе вода–порода в условиях антропогенного загрязнения.

### Введение

1. Водные формы стронция
2. Зависимость адсорбции стронция от pH раствора
3. Механизмы и изотермы адсорбции стронция
  - 3.1. Адсорбция на глинистых минералах
  - 3.2. Адсорбция горными породами
4. Конкурентные реакции
  - 4.1. Влияние макрокатионов на адсорбцию стронция
  - 4.2. Константы бинарного обмена стронция с макрокатионами
  - 4.3. Коэффициенты селективности обмена стронция с кальцием
  - 4.4. Модельные расчеты коэффициентов селективности
5. Комплексные соединения стронция
  - 5.1. Неорганические лиганды
  - 5.2. Органические лиганды
6. Зависимость сорбции стронция от физических свойств и состава горных пород
7. Формирование твердой фазы
8. Десорбция
9. Миграция
  - 9.1. Миграция стронция в почвенном профиле
  - 9.2. Содержание стронция в почвах, обработанных ОСВ
  - 9.3. Выщелачивание из почв, обработанных осадком сточных вод
  - 9.4. Миграция в почвах, обработанных осадком сточных вод
  - 9.5. Миграция в местах захоронения жидких радиоактивных отходов
10. Коэффициент распределения,  $K_d$ 
  - 10.1. Уравнение замедления
  - 10.2. Определения  $K_d$  для природных сорбентов

10.3. Компиляция значений  $K_d$

*10.3.1. Почвы и горные породы*

*10.3.2. Чистые минеральные фазы*

**11. Моделирование адсорбции стронция**

**Заключение**

**Литература**

## 2.6. Уран

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Уран: Аналит. обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2014. – 127 с. – Библиогр.: С. 103–124 (330 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 103).

Данный выпуск серии «Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами» посвящен изучению адсорбционного/десорбционного поведения урана. Загрязнение ураном подземных вод, почв и горных пород – важная проблема из-за длительной токсичности соединений урана. Обедненный уран является побочным продуктом процесса обогащения, применяемого в производстве атомной энергии, и связанная с этим опасность обусловлена и радиоактивностью урана, и его токсичностью как тяжелого металла. Представлены механизмы адсорбции урана почвами и горными породами в зависимости от природы поглотителя и различных условий окружающей среды, а также кинетика адсорбции. Изучено влияние на адсорбционное поведение урана характеристик твердой и жидкой фаз в системе вода–порода. Представлены параметры изотерм адсорбции и коэффициенты распределения. Рассмотрены роль микроорганизмов в поведении урана, условия его биовосстановления, а также формирование геохимических барьеров как метод биоремедиации загрязненных подземных вод. Одной из практических задач настоящего аналитического обзора является получение информации для моделирования поведения урана в системе вода–порода в условиях антропогенного загрязнения.

### Введение

#### 1. Общие свойства. водная химия урана

- 1.1. Гидролиз
- 1.2. Карбонатные комплексы
- 1.3. Другие лиганды

#### 2. Геохимия урана

- 2.1. Эксперименты по адсорбции урана на чистых минеральных фазах
  - 2.1.1. *Оксиды железа*
    - 2.1.1.1. Кинетика поглощения, pH-зависимость и влияние ионной силы
    - 2.1.1.2. Изотермы
    - 2.1.1.3. Термодинамические параметры
  - 2.1.2. *Глинистые минералы*
    - 2.1.2.1. Кинетика поглощения, pH-зависимость и влияние ионной силы
    - 2.1.2.2. Изотермы
  - 2.1.3. *Кварц*
- 2.2. Взаимодействие с органическим веществом
- 2.3. Сорбция урана на природных материалах
  - 2.3.1. *Бактериогенные оксиды железа*
  - 2.3.2. *Горные породы*
  - 2.3.3. *Исследования на территории Хенфордского комплекса*
  - 2.3.4. *Сравнительное изучение адсорбции тяжелых металлов и урана различными природными сорбентами*
- 2.4. Поверхностное комплексообразование как механизм адсорбции

#### 3. Коэффициент распределения ( $K_d$ ) урана

- 3.1. Изменчивость значений  $K_d$
- 3.2. Определение  $K_d$  для хвостохранилищ
- 3.3. Удельная площадь поверхности и  $K_d$

#### **4. Биовосстановление урана (VI) в системе вода–порода**

- 4.1. Разнообразие микроорганизмов, участвующих в анаэробном восстановлении урана (VI)
- 4.2. Совместное влияние железа Fe(III) и сульфат-иона на биовосстановление урана (VI)
- 4.3. Связь микробиальных и абиотических процессов при восстановлении урана (VI)
  - 4.3.1. *Сульфид-ион*
  - 4.3.2. *Бикарбонат-ион*
- 4.4. Факторы, ограничивающие микробиальное восстановление урана (VI)
  - 4.4.1. *Кальций*
  - 4.4.2. *Оксиды железа (III)*
  - 4.4.3. *Нитрат-ион*
  - 4.4.4. *Фосфат-ион*
  - 4.4.5. *Гумусовое вещество и пигменты*

#### **5. Удаление урана из загрязненных почв**

- 5.1. Фиторемедиация и хелатирующие агенты
- 5.2. Сравнительная оценка влияния хелатирующих агентов на выщелачивание урана

#### **6. Использование геохимических барьеров для реабилитации подземных вод**

**Заключение**

**Литература**

### **3. Поведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Трансформация, адсорбция/десорбция, миграция**

*Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Поведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Трансформация, адсорбция/десорбция, миграция: Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2011. – 249 с. – Библиогр.: С. 227–244 (277 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 97).

Широкое распространение загрязнения окружающей среды мышьяком привело к интенсивному изучению его поведения и, особенно, миграции в природных средах. Повышенные концентрации мышьяка в подземных водах, используемых для питьевого водоснабжения, вызывают хронические заболевания людей и обусловлены как антропогенным загрязнением почв и пород, так и высоким природным содержанием этого элемента в водовмещающих породах. При изменении условий окружающей среды миграция мышьяка в подземные воды может резко возрасти. Для прогнозирования таких процессов необходимо рассматривать формы нахождения мышьяка, особенности его поведения, учитывать характер, последовательность и зональность химических и микробиологических процессов.

В обзоре дается наиболее полное описание исследований поведения мышьяка в окружающей среде (почвах, горных породах, донных отложениях, поверхностных и подземных водах). Подробно рассмотрены содержание, химические формы и трансформации мышьяка, а также процессы адсорбции и десорбции, которые контролируют подвижность и биодоступность мышьяка в системе вода–порода. Изучено влияние состава твердой и жидкой фаз на процессы адсорбции и десорбции, условия и механизмы поглощения мышьяка. Отдельно рассмотрено состояние и поведение мышьяка в горнорудных отвалах. Представлены значения коэффициента распределения ( $K_d$ ) в различных почвах и породах, а также для отдельных минералов. Приведены примеры моделирования адсорбции и миграции мышьяка.

#### **Введение**

- 1. Термины и обозначения**
- 2. Природное содержание общего мышьяка**
  - 2.1. Содержание мышьяка в твердой фазе
    - 2.1.1. Горные породы
    - 2.1.2. Почвы
    - 2.1.3. Донные отложения
  - 2.2. Концентрации мышьяка в природных водах
    - 2.2.1. Поверхностные воды
    - 2.2.2. Подземные воды
    - 2.2.3. Поровые воды отложений
  - 2.3. Атмосферные выпадения
- 3. Трансформации мышьяка в природной среде**
  - 3.1. Основные реакции
  - 3.2. Биологические трансформации
  - 3.3. Абиотические процессы трансформации
  - 3.4. Скорости трансформаций
  - 3.5. Круговорот мышьяка в природе
  - 3.6. Общий миграционный цикл
- 4. Химия мышьяка в системе «вода–порода»**

- 4.1. Водные формы мышьяка при различных окислительно-восстановительных условиях
- 4.2. Формы и реакции мышьяка в почвенных растворах
- 5. Основные поглотители, участвующие в адсорбции мышьяка**
  - 5.1. Оксиды железа
  - 5.2. Оксиды алюминия
  - 5.3. Оксиды марганца
  - 5.4. Оксиды кремния, глинистые минералы
  - 5.5. Карбонатные минералы, известковые почвы
  - 5.6. Роль органического вещества и биогенных частиц
  - 5.7. Поглощение природными материалами
- 6. Общие исследования адсорбции**
  - 6.1. Механизмы адсорбции
  - 6.2. Окислительно-восстановительные процессы и механизмы поглощения мышьяка
  - 6.3. Изотермы адсорбции
  - 6.4. Изотермы десорбции
  - 6.5. Модели поверхностного комплексообразования
- 7. Влияние характеристик водной фазы на механизмы адсорбции мышьяка**
  - 7.1. Ионная сила
  - 7.2. Влияние pH
  - 7.3. Сопутствующие ионы
    - 7.3.1. Неорганические лиганды
    - 7.3.2. Органические компоненты
    - 7.3.3. Кальций и магний
  - 7.4. Конкуренция адсорбция среди анионов
- 8. Влияние свойств поглотителя на адсорбцию мышьяка**
  - 8.1. Площадь поверхности
  - 8.2. Адсорбция As(V) в незагрязненных почвах
    - 8.2.1. Пример регрессионного анализа
    - 8.2.2. Применение модели с двумя типами участков
  - 8.3. Адсорбция мышьяка в загрязненных почвах
    - 8.3.1. Регрессионный анализ
    - 8.3.2. Влияние pH на  $K_d$  мышьяка
- 9. Кинетика адсорбции мышьяка As(V) оксидами железа**
  - 9.1. Соосаждение и адсорбция
  - 9.2. Кинетика адсорбции
  - 9.3. Влияние природы адсорбирующей поверхности оксида на кинетику адсорбции
  - 9.4. Диффузия как процесс, определяющий скорость поглощения мышьяка
- 10. Десорбция мышьяка**
  - 10.1. Кинетика процесса десорбции арсената
  - 10.2. Механизм десорбции арсената
  - 10.3. Влияние различных факторов на десорбцию мышьяка
- 11. Выщелачивание мышьяка**
  - 11.1. Основные реакции выщелачивания мышьяка из пород
  - 11.2. Роль макроионов в выщелачивании мышьяка
  - 11.3. Выщелачивание мышьяка инфильтрующимися водами при аэробных / анаэробных условиях
    - 11.3.1. Из отложений
    - 11.3.2. Из песчаника
  - 11.4. Механизмы выщелачивания мышьяка
    - 11.4.1. Окисление / восстановление в присутствии сульфидов
    - 11.4.2. Окисление / восстановление в присутствии оксидов
    - 11.4.3. Окисление / восстановление с участием микроорганизмов



## **12. Миграция мышьяка**

- 12.1. Влияние pH на миграцию мышьяка
- 12.2. Миграция в присутствии карбонат-ионов
- 12.3. Влияние конкуренции фосфата на миграцию мышьяка
- 12.4. Коллоиды

## **13. Моделирование адсорбции и миграции As(V) в гетерогенной системе**

### **14. Формирование твердых фаз мышьяка**

- 14.1. Арсенатные минералы в почвах и их растворимость
- 14.2. Термодинамические расчеты условий растворимости арсенатов
- 14.3. Переменные окислительно-восстановительные условия и растворимость минералов As(III) в почвах

### **15. Мышьяк (III) в подземных водах**

- 15.1. Влияние pH и точки нулевого заряда поверхности адсорбента
- 15.2. Окислительно-восстановительные реакции As(III)
- 15.3. Изотермы адсорбции As(III)
- 15.4. Кинетика адсорбции As(III)
- 15.5. Десорбция арсенита As(III)
  - 15.5.1. Абиотическое восстановление
  - 15.5.2. Скорость десорбции
  - 15.5.3. Механизм десорбции As(III) в аллювиальных системах подземных вод
- 15.6. Сравнение миграции As(III) и As(V)

### **16. Загрязнение мышьяком природной среды в районах горных работ**

- 16.1. Миграция мышьяка из горнорудных отвалов и накопление в донных отложениях
- 16.2. Потоки мышьяка в системе «водная среда – отложения»
- 16.3. Влияние характеристик системы «водная среда – отложения» на распределение мышьяка
  - 16.3.1. Оксиды железа и марганца
  - 16.3.2. pH
  - 16.3.3. Окислительно-восстановительные условия
- 16.4. Моделирование миграции мышьяка в системе «водная среда – донные отложения»
- 16.5. Моделирование адсорбции и миграции мышьяка в водоносных горизонтах и отвалах

### **17. Данные о коэффициенте распределения, $K_d$ , мышьяка**

- 17.1. Минералы
- 17.2. Почвы и породы
- 17.3. Компиляции

## **Заключение**

## **Литература**

## **4. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов**

*Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов: Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН. – Новосибирск, 2005. – 100 с. – Библиогр.: С. 91–98 (119 назв.). – (Сер. Экология; Вып. 76).

В последние десятилетия вокруг мегаполисов и промышленных центров сформировались значительное количество свалок твердых бытовых отходов (ТБО) как специально оборудованных (полигоны), так и стихийных, которые оказывают существенное влияние на экологическое состояние окружающей среды. Влияние свалок в значительной степени обусловлено поступлением компонентов, присутствующих в ТБО, большая часть которых относится к классу токсичных соединений. В связи с этим одним из важнейших вопросов является выяснение закономерностей миграции как токсичных, так и других химических соединений из свалки в окружающую среду. В настоящее время установлено, что весьма существенное влияние на миграционную способность химических элементов оказывает органическое вещество свалочных отложений, и благодаря его участию в различных физических, химических и биохимических процессах многие элементы, входившие в состав отходов, обнаруживаются впоследствии в подземных водах в заметных концентрациях даже на больших глубинах.

### **Введение**

#### **1. Морфологический состав твердых бытовых отходов**

#### **2. Дегградация органического вещества в свалке**

2.1. Аэробные условия

2.2. Анаэробные условия

2.2.1. Фаза ацетогенеза

2.2.2. Фаза метаногенеза

2.3. Общая схема дегградации отходов

#### **3. Гумификация свалочных отходов**

#### **4. Формирование фильтрата**

4.1. Водный баланс

4.2. Состав фильтрата

4.3. Миграция органического вещества со свалочным фильтратом

4.4. Миграция тяжелых металлов с органическим веществом свалочного фильтрата

#### **5. Преобразование органического вещества в глинистых отложениях**

#### **6. Загрязнение подземных вод**

#### **7. Заключение**

#### **Литература**