

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 544.4+57.03+58.051

**КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ РАСТЕНИЯМИ
МЕТАЛЛОВ. ЗОЛОТО И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ПРИРОДНЫХ УГЛЯХ РОССИИ**

**Сергей Дмитриевич Варфоломеев^{1,2}, Кирилл Михайлович Соловьев³,
Ирина Владимировна Гачок¹, Светлана Батожаргаловна Цыбенова²**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Институт физико-химических основ функционирования сетей нейронов и искусственного интеллекта

² Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН

³ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

Автор, ответственный за переписку: Светлана Батожаргаловна Цыбенова, s.tsybenova@gmail.com

Аннотация. Обсуждается явление концентрирования металлов растениями. Содержание металлов в растениях может в десятки и сотни раз превышать содержание металлов в почве. Развита кинетическая модель фитомайнинга. Проведена верификация модели на основе экспериментальных данных, показана двухкамерность процесса, дан параметрический анализ модели с выяснением роли скорости переноса металла из геосферы, транслокации металла в растении, дано описание динамики биоаккумуляции металлов. Природные угли характеризуются исключительно высокой зольностью (содержанием металлов до 50%) и являются динамическим отражением концентрирования металлов в течение больших периодов времени. Представленные данные по содержанию металлов во многих угольных месторождениях России (Подмосковный, Донецкий бассейн, месторождения Сибири). Дано распространение модели фитомайнинга на макроисторическом периоде (десяtkи и сотни миллионов лет). Показан рост зольности металлов с возрастом формирования угольных месторождений.

Ключевые слова: кинетическая модель, золото, редкоземельные элементы, химический состав, природный уголь, фитомайнинг

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-3-181-196

Финансирование. Настоящая работа выполнена в рамках государственных заданий Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН № 122041300210-2 и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121041500039-8.

Для цитирования: Варфоломеев С.Д., Соловьев К.М., Гачок И.В., Цыбенова С.Б. Кинетическая модель концентрирования растениями металлов. Золото и редкоземельные элементы в природных углях России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 3. С. 181–196.

ORIGINAL ARTICLE

KINETIC MODEL OF METAL ACCUMULATION BY PLANTS. GOLD AND RARE EARTH ELEMENTS IN NATURAL COALS OF RUSSIA**Sergey D. Varfolomeev^{1,2}, Kirill M. Solov'ev³, Irina V. Gachok¹, Svetlana B. Tsybenova²**¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Institute of Physicochemical Foundations of the Functioning of Neural Network and Artificial Intelligence² Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences³ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting**Corresponding author:** Svetlana B. Tsybenova, s.tsybenova@gmail.com

Abstract. The phenomenon of metal accumulation by plants is discussed. The metal content in plants can be tens to hundreds of times higher than the metal content in the soil. A kinetic model of phytomining has been developed. The model was verified based on experimental data, revealing a two-chamber nature of the process. A parametric analysis of the model was conducted, clarifying the role of the metal transfer rate from the geological substrate, metal translocation within the plant, and describing the dynamics of metal bioaccumulation. Natural coals are characterized by exceptionally high ash content – a metal content of up to 50% – and represent a dynamic reflection of metal accumulation over vast periods of time. Data on the metal content in many coal deposits across Russia (Moscow region basin, Donetsk basin, and deposits in Siberia) are presented. The phytomining model is extended to a macro-historical period (tens to hundreds of millions of years). An increase in the ash content of metals with the age of the coal deposit formation is demonstrated.

Keywords: kinetic model, gold, rare-earth elements, chemical composition, natural coal, phytomining

Financial Support. The work was carried out within the framework of state assignments of the Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences No. 122041300210-2 and Lomonosov Moscow State University No. 121041500039-8.

For citation: Varfolomeev S.D., Solov'ev K.M., Gachok I.V., Tsybenova S.B. Kinetic model of metal accumulation by plants. gold and rare earth elements in natural coals of Russia // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 3. S. 181–196.

Явление концентрирования металлов растениями основано на способности растений выкачивать из почвы колоссальные объемы воды с содержащимися в ней металлами. Феномен концентрирования металлов растениями получил название фитомайнинга. Эффекты накопления металлов биомассой растений могут быть весьма значительными. Содержание металлов в растениях может в десятки и сотни раз превышать содержание металлов в почве [1–5]. Например, содержание (мг/кг, г/т) золота в сухой биомассе (в скобках дан коэффициент биоаккумуляции – отношение содержания металла в биомассе растения к его содержанию в почве): морковь –

48,3 (12,7), свекла – 113 (29,7), редис – 102 (26,8) [6]; индийская горчица (*Brassica juncea*) – 57 (11,4) [5] (326 (62,5) [7], (760 (15,8) [8]); цикорий (*Cichorium intybus*) – 164 (32,8) [7]; австралийские природные растения – 26,9 (15,3) [9]; подсолнечник – 19,2 (8,1) [10]. Реагентами, существенно улучшающими подвижность золота в почве и обеспечивающими накопление его в растениях, являются цианиды, роданиды и тиосульфаты.

Аналогичная картина просматривается в аккумуляции растениями платины и палладия: (мг/кг, г/т): сосна – 0,25 [11]; дуб – 0,4 (2,8) [12]; астерация – 1,25 (11,3) [13]; конопля – 62 (147) [14]; мискантус – 500 (10), ива – 1500 (30), горчи-

ца – 800 (16) [15]; горчица белая (корни) – 5973 [16]. Аккумуляция редкоземельных металлов (РЗЭ) растениями в зонах, далеких от зон добычи (мг/кг, г/т): североамериканский орешник – 2000, ложный орешник – 1350, *Phytolacca Americana* – 581 (1,5), папоротник (*Prinephrium simplex*) – 1234 (36), папоротник (*Dicranopteris linearis*) – 1175 (14,7) [17].

Фитомайнинг металлов имеет общий для растительного мира характер и в настоящее время приобретает технологическое значение [18–21]. Важно подчеркнуть, что гипераккумуляция металлов происходит не только при культивировании растений в зонах высокой природной концентрации, но и в областях, далеких от зон добычи.

Представляет интерес построение кинетических моделей явления с выяснением механизма и оценкой кинетических параметров процесса. Ниже представлены кинетические схемы и динамические модели фитомайнинга трех уровней.

1. Двухкамерный характер фитомайнинга с экспериментальной верификацией модели.

2. Кинетическая модель фитомайнинга с учетом взаимодействия растения, почвы, геологической подосновы.

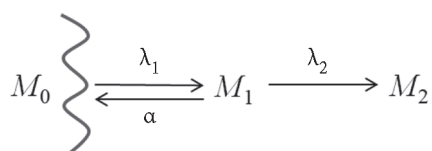
3. Динамические закономерности и возможная роль фитомайнинга в формировании месторождений.

Обсуждение результатов

Двухкамерный характер фитомайнинга. Экспериментальная верификация модели

Кинетическая модель переноса металла в растение представлена на схеме 1, где M_0 – содержание концентрации металла в почве; M_1 – концентрация металла в корнях растения (первая камера); M_2 – концентрация металла в надземной части растения (вторая камера); λ_1 , λ_2 – константы скорости перехода металла из почвы в корни (λ_1) и в надземную часть растения (λ_2); α – константа скорости обратного оттока металла из корней растения в почву. В первом приближении считается, что объемы камер постоянны.

С х е м а 1



Базовую модель можно описать с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= \lambda_1 M_0 - \lambda_2 M_1 - \alpha M_1, \\ \frac{dM_2}{dt} &= \lambda_2 M_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где $M_0 = M_0(0) - M_1 - M_2$, $M_0(0)$ – концентрация металла в почве в начальный момент времени. Начальные условия приняты в виде: $t = 0$, $M_1(0) = 0$, $M_2(0) = 0$.

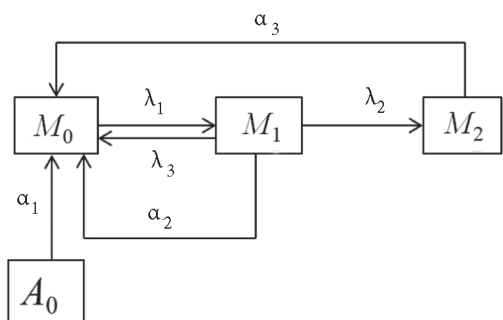
Интегрирование системы уравнений (1), параметрический анализ и подбор параметров, описывающих экспериментальные данные проведены на основе численного (m, k)-метода решения жестких систем, программно реализованного в среде Delphi Community Edition.

Идеальные экспериментальные данные для верификации модели представлены в работе [22] (Южная Африка). Исследователи выращивали растение *Chrysopogon zizanioides* в почве, затем аккуратно освобождали его от почвы и адаптировали в режиме гидропоники (корни в водной среде). Затем в водную среду вводили соль Pd и анализировали динамику уменьшения Pd в воде и накопления в растении. Экспериментальные и кинетические расчетные данные представлены на рис. 1. Видно, что кинетика процесса носит двухфазный характер. На рис. 1. представлены экспериментальные данные и результаты интегрирования системы уравнений (1) при значениях параметров $\lambda_1 = 2 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,4 \text{ сут}^{-1}$, $\alpha = 4 \text{ сут}^{-1}$. Принципиально важно отметить, что экспериментально наблюдаемый двухстадийный характер процесса реализуется только при весьма заметном обратном оттоке металла из корней, $\alpha = 4 \text{ сут}^{-1}$. Если принять $\alpha = 0$, процесс накопления металла будет иметь экспоненциальный одностадийный характер. Приведены расчеты при вариации параметра λ_1 . При увеличении λ_1 происходит быстрый переход металла в корни на начальном этапе процесса. Видно, что уменьшение скорости обратного оттока металла из первой камеры (корни) увеличивает интенсивность накопления металла в корнях. Двухфазный кинетический характер процесса соответствует двухстадийной схеме и является свидетельством двухкамерности механизма поглощения металла растением.

Динамика фитомайнинга. Растение, почва, геооснова

Рассмотрим кинетическую модель фитомайнинга с учетом взаимодействия растения

Схема 2



и почвы в рамках двухкамерности процесса, представленную на схеме 2, где A_0 – концентрация металла в зоне геосферы культивирования

растения, M_0 – концентрация металла в почве в зоне подземной части растения, M_1 – концентрация металла в корнях растения (первая камера), M_2 – концентрация металла в надземной части растения (вторая камера), λ_1, λ_2 – константы скорости перехода металла из почвы в корни (λ_1) и из корня в надземную часть растения (λ_2); λ_3 – константа скорости обратного оттока металла из корней растения в почву; α_1 – константа скорости поглощения металла из окружающей среды, α_2 – константа скорости перехода металла после периода вегетации, α_3 – константа скорости перехода металла из надземной в подземную часть растения после периода вегетации. В соответствии со схемой 2

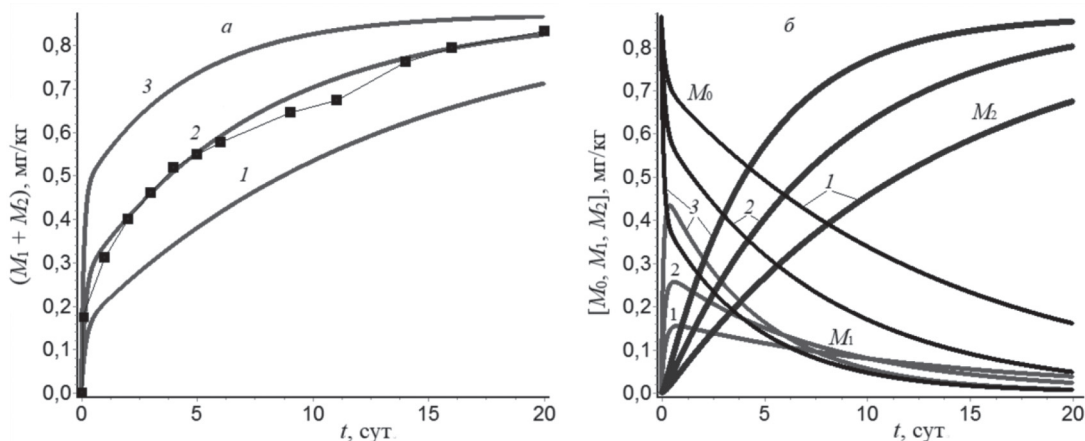


Рис. 1. Динамика изменения концентраций: а – $(M_1 + M_2)$; б – M_0, M_1, M_2 по времени при варьировании параметра $\lambda_1, \text{сут}^{-1}$ (1 – 1, 2 – 2, 3 – 5) и при $\lambda_2 = 0,4 \text{ с/г}$, $\alpha = 4 \text{ с/г}$, $M_0 = 0,87 \text{ мг/кг}$. Экспериментальные данные – линия с точками, теоретические – сплошная линия

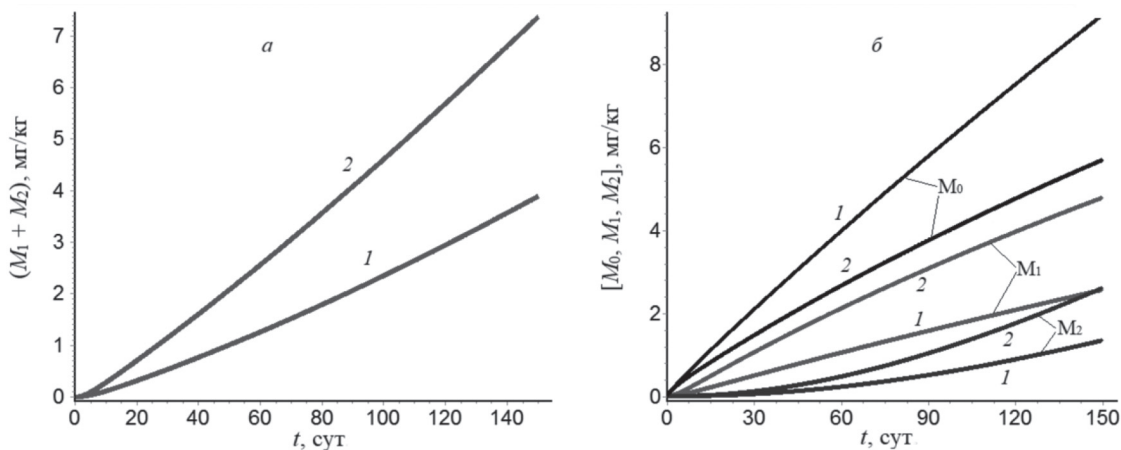


Рис. 2. Динамика изменения концентрации: а – $(M_1 + M_2)$; б – M_0, M_1, M_2 по времени при варьировании скорости переноса металла в зону поглощения растением $\lambda_1, \text{сут}^{-1}$ (1 – 0,05; 2 – 0,15), остальные значения параметров даны в тексте выше

базовую модель (1) можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dM_0}{dt} &= \alpha_1 A_0 - \beta M_0 - \lambda_1 M_0 + \lambda_3 M_1 + \alpha_2 M_1 + \alpha_3 M_2, \\ \frac{dM_1}{dt} &= \lambda_1 M_0 - \lambda_2 M_1 - \lambda_3 M_1 - \alpha_2 M_1, \\ \frac{dM_2}{dt} &= \lambda_2 M_1 - \alpha_3 M_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где A_0 – концентрация металла в геозоне культивирования растения.

Начальные условия для системы (2) могут быть записаны в виде: $t = 0, M_0(0) = 0, M_1(0) = 0, M_2(0) = 0$. Численные расчеты проведены при следующем базовом наборе значений параметров: $A_0 = 8,7$ мг/кг, $\lambda_1 = 0,05$ сут⁻¹, $\lambda_2 = 0,008$ сут⁻¹, $\lambda_3 = 0,16$ сут⁻¹, $\alpha_1 = 0,01$ сут⁻¹, $\alpha_2 = 0,005$ сут⁻¹, $\alpha_3 = 0,003$ сут⁻¹, период вегетации $t = 150$ сут.

На рис. 2 представлены изменения концентраций металла в надземной части растения (*a*) и динамика концентраций M_0, M_1 и M_2 (*б*) при варьировании скорости перехода металла из почвы в корни (λ_1). При увеличении параметра λ_1 видно, что концентрации $M_1 + M_2, M_1$ и M_2 растут, а M_0 снижается.

Очевидно, что содержание металла A_0 разное для различных зон культивирования растения. В геологической зоне добычи металла его уровень концентрации может существенно превышать уровень концентрации в зоне, далекой от региона добычи металлов. На рис. 3 представлена

зависимость динамики процесса от общего буферного содержания металла в геозоне A_0 .

Культивирование растений, являющихся аккумуляторами металлов, должно приводить к накоплению металла в почве. При условии, что после процесса вегетации подземной и надземной частей растения сохраняются в зоне культивирования, разрушение структур обеспечивает перенос металла в почву (параметры α_2 и α_3).

Растения существенным образом могут различаться по физиологическим параметрам и, как следствие, по способности аккумулировать металлы. Представленная выше кинетическая модель может прогнозировать поведение того или иного растительного организма по величине основных параметров $\alpha_1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Условно растения можно разделить на два основных класса – «умеренные» биоаккумуляторы и гипераккумуляторы. В рамках предложенной модели коэффициенты биоэффективности аккумулярования (*BF*) и транслокации (*TF*) могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} BF(t) &= \frac{M_1(t) + M_2(t)}{M_0(t)}, \\ TF(t) &= \frac{M_2(t)}{M_1(t)}. \end{aligned}$$

На рис. 4 приведены результаты расчетов для «умеренных» аккумуляторов при вариации параметра скорости поглощения металла λ_1 (рис. 4). Чем выше скорость поглощения металла корнями

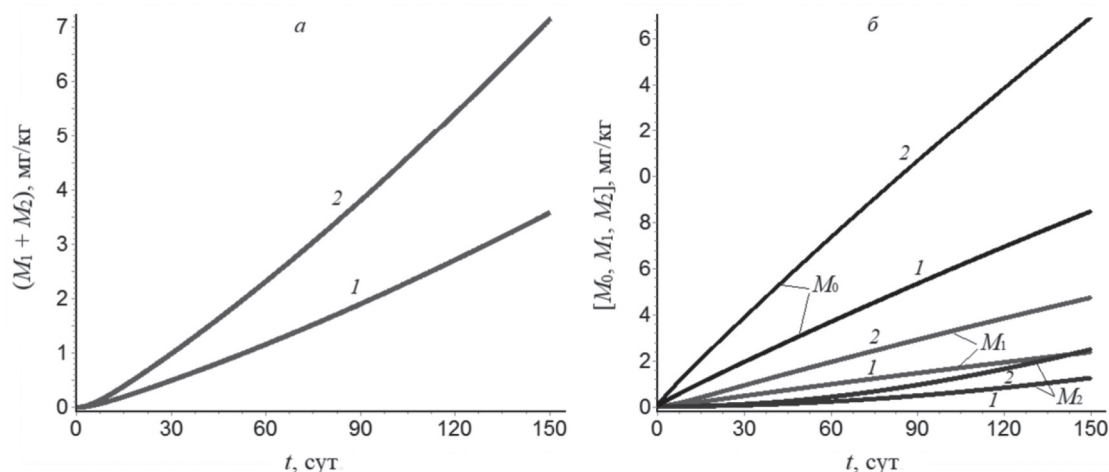


Рис. 3. Зависимость изменения концентраций: *a* – ($M_1 + M_2$); *б* – M_0, M_1, M_2 от времени при варьировании содержания металла в геозоне культивирования растения A_0 , мг/кг (1 – 8,7; 2 – 16), значения остальных параметров даны в тексте

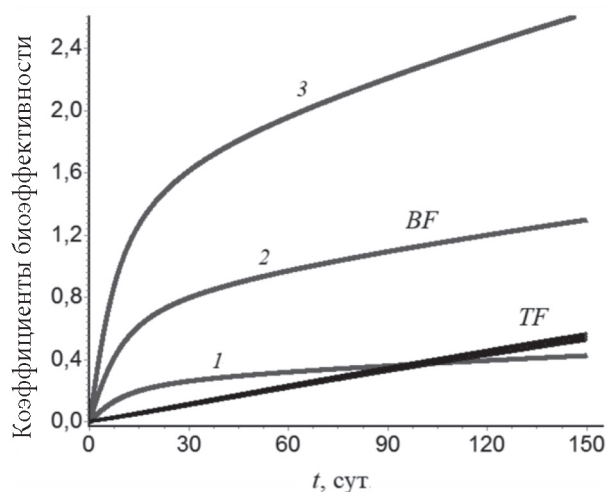


Рис. 4. Динамика изменения коэффициентов биоаккумуляции BF и транслокации TF по времени при вариации скорости поглощения металла корнями растения λ_1 , (сут^{-1}):
1 – 0,05; 2 – 0,15; 3 – 0,3

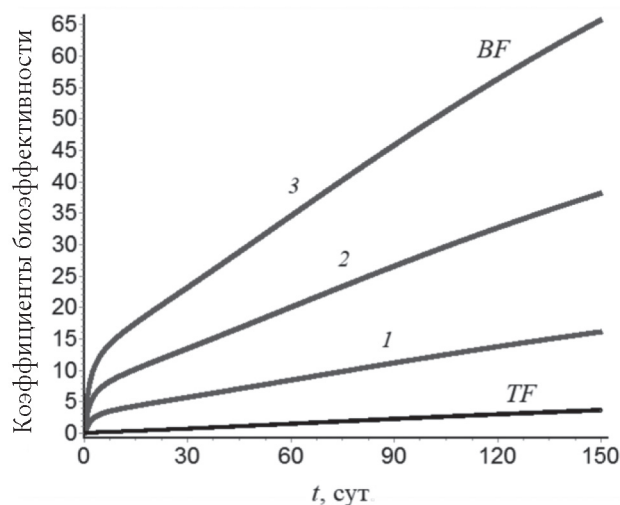


Рис. 5. Зависимости изменения коэффициентов биоаккумуляции BF и транслокации TF от времени при вариации скорости поглощения металла корнями растения λ_1 , (сут^{-1}):
1 – 3; 2 – 7; 3 – 12

растения из почвы, тем выше коэффициент биоаккумуляции (BF). При этом коэффициент транслокации (TF) почти не меняется.

Несколько парадоксальным выглядят зависимости $BF(t)$ и $TF(t)$ при варьировании буферного содержания металла в геозоне A_0 . Это связано с тем, что данные параметры являются относительными величинами и при увеличении A_0 синхронно растет как числитель, так и знаменатель величин $BF(t)$ и $TF(t)$. Используемые при расчетах значения параметров λ_1 , λ_2 , λ_3 характерны для «умеренных» аккумуляторов – значения $BF(t)$ группируются около единицы.

Для гипераккумуляторов имеет место повышение значения скорости поглощения металла корнями растения λ_1 (рис. 5), скорости транслокации λ_2 и изменения обратного переноса металла в почву. Увеличение параметров λ_1 и λ_2 ведет к росту коэффициента биоаккумуляции BF , тогда как повышение параметра λ_3 , наоборот, к снижению BF . Видно, что коэффициент биоаккумуляции $BF(t)$ за период вегетации (150 сут.) существенно превышает единицу (50–70). Эти параметры характерны для растительных гипераккумуляторов, описанных выше. Расчет модели (2) проведен при следующем наборе значений параметров:

$A_0 = 8,7$ мг/кг, $\lambda_1 = 7$ сут.⁻¹, $\lambda_2 = 0,04$ сут.⁻¹, $\lambda_3 = 0,8$ сут.⁻¹, $\alpha_1 = 0,01$ сут.⁻¹, $\alpha_2 = 0,005$ сут.⁻¹, $\alpha_3 = 0,003$ сут.⁻¹, период вегетации – 150 сут.

Роль фитомайнинга в формировании месторождений металлов

Растения циклически выкачивают из почвенного покрова металлы за счет процесса фитомайнинга, при этом после вегетации значительная часть металлов возвращается в почву. Это должно приводить к накоплению металлической составляющей. Возможно, это играет роль в геологических накоплениях и формировании месторождений. Принципиально важный фактор в этом процессе – время. В природных условиях эти процессы могли протекать в течение тысячелетий и миллионов лет. Свидетельством важной роли накопления металлов в результате фитомайнинга является в высшей степени высокая концентрация металлов в углях природного происхождения. Общие оценки зольности углей (содержание солей и окислов металлов после удаления углерода в результате сгорания) обнаруживают, что почти половина состава добываемых углей имеют металлическую природу: Зольность каменного угля, бурого угля и антрацита составляет 10–40, 7–45 и 15–25% соответственно. Общепринятым является представление о том, что угольные месторождения – продукт конверсии растений. Зольные отвалы угольных электростанций содержат практически весь набор металлов (см. ниже).

Представляет интерес моделирование динамики процесса фитомайнинга в макроисторическом масштабе с использованием численных параметров процесса сопоставимых с экспериментальными оценками сделанными выше.

Базовой основой процесса является кинетическая схема 2. Принципиально значимыми представляются процессы возврата металла в зону с концентрацией M_0 , характеризующейся параметрами α_2 и α_3 , а также концентрация металла в геоснове системы (концентрация A_0). Расчеты проведены в режиме многократных вегетационных циклов (годовой цикл вегетации), при этом для каждого цикла начальным состоянием является M_0 после очередного вегетационного процесса. Для многолетних растений возврат металла связан с листопадом (α_3), для однолетних растений – с процессом $M_1 \rightarrow M_0$ (параметр α_2). Принципиально значимыми представляются два важных случая.

Рост концентрации и накопления металла в почвенном слое. Кинетическая модель, описывающая динамику процесса, задана системой уравнений (2). На рис. 6 представлены результаты такого расчета при варьировании буферного содержания металла в геоснове A_0 . Наблюдается практически линейный рост с выходом на промышленно значимый уровень добычи металла (2 г) через 20–40 тыс. лет.

Возможное влияние растения на геоснову. Рост растения представляет собой сложный химический процесс с выделением метаболитов в

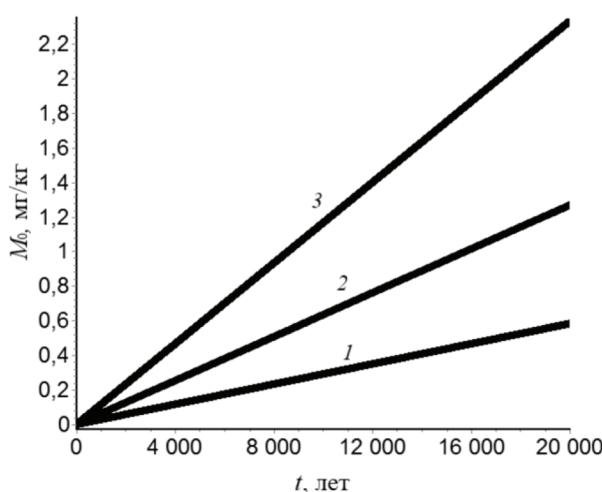


Рис. 6. Зависимости накопления концентрации M_0 в почве от числа циклов культивирования растения при варьировании буферного содержания металла в геоснове A_0 (мг/кг): 1 – 4; 2 – 8,7; 3 – 16

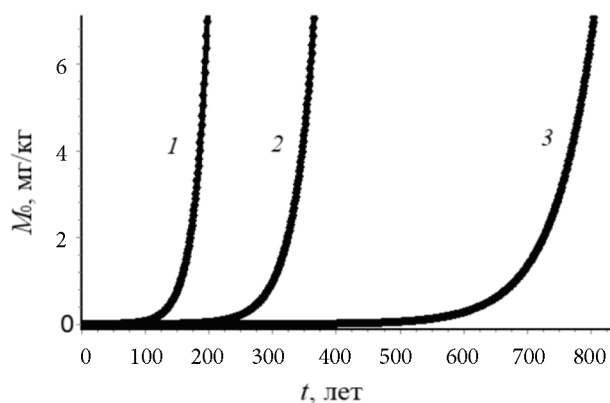


Рис. 7. Динамика изменения концентрации в почве M_0 от числа циклов культивирования растения при $A_0 = \text{const}$ и вымывании в силу метеорологических условий M_0 на 80% (мг/кг). При $\gamma A_0 > \lambda_1$ значения параметров при разных типах аккумуляций: 1 – «гипераккумуляция» ($\lambda_1 = 0,005$; $\lambda_2 = 8 \times 10^{-4}$; $\lambda_3 = 0,016$; $\alpha_1 = 0,01$; $\gamma = 1,55 \times 10^3$); 2 – «умеренная» ($\lambda_1 = 5 \times 10^{-4}$; $\lambda_2 = 8 \times 10^{-5}$; $\lambda_3 = 1,6 \times 10^{-3}$; $\alpha_1 = 10^{-3}$; $\gamma = 1,3 \times 10^3$); 3 – «слабая» ($\lambda_1 = 5 \times 10^{-5}$; $\lambda_2 = 8 \times 10^{-6}$; $\lambda_3 = 1,6 \times 10^{-4}$; $\alpha_1 = 10^{-4}$; $\gamma = 1,25 \times 10^3$); значения остальных параметров: $A_0 = 8,7$ мг/кг, $\alpha_2 = 0,005$ сут $^{-1}$, $\alpha_3 = 0,003$ сут $^{-1}$, период вегетации растения – 150 дней

почвенный слой. Известно, что для компенсации поглощенных металлов в целях сохранения электронейтральности системы растения переносят ионы водорода в почву, продуцирующую органические кислоты. В некоторых случаях это может активировать геосферу с продуцированием растворимых солей металла. В математическом плане это проявляется в добавлении к динамике изменения концентрации металла M_0 дополнительного положительного члена $\gamma A_0 M_0$. При значимых значениях концентрации A_0 это может существенным образом изменить кинетическое поведение системы (рис. 7).

Можно наблюдать «экспоненциальный взрыв» накопления металла, при этом существенное различие во времени возникновения месторождения зависит от природы растения, т.е. от уровня биоаккумуляции: слабого, умеренного или высокого. При относительно высоких значениях A_0 , α_1 , λ_1 , процесс накопления металла может происходить быстро.

Фитомайнинг и концентрирование металлов в угольных месторождениях России

На основании общепринятой теории органического происхождения угля следует предположить, что химические вещества, находившиеся в составе древних растений при их жизни, в том или ином виде сохранились в нынешних уголь-

ных отложениях. Содержание металлов в природных углях может представлять собой физический «слепок» активности древних растений.

Подмосковный угольный бассейн представляет собой бурогольные залежи, простирающиеся в Ленинградской, Новгородской, Тверской, Смоленской, Московской, Калужской, Тульской и Рязанской областях. Общие геологические ресурсы угля составляют 11 млрд т. Балансовые запасы более 3,5 млрд т [23].

Угли с высокой зольностью (45–55%) составляют около 10% всех учтенных запасов бассейна. Угли месторождений, расположенных в западной части Тульской и восточной части Калужской областей, характеризуются повышенной зольностью (35–45%); в западных районах Калужской области зольность составляет 30–35%. Наименее зольные угли распространены в основном в центральной и восточной частях бассейна (табл. 1).

Важной представляется информация о геохимическом составе почв на территории Подмосковного угольного бассейна: «В результате работы были выявлены следующие закономерности в характеристике загрязняющих веществ в северо-восточной части Щекинского района: основными загрязнителями почв являются Zn, Ni, Pb, Zr, Ba, Ti и P. По содержанию в травянистой растительности преобладают Cr, Cu и Ni. В листьях деревьев обнаружены такие токсиканты, как Cr, Mn и Ni.» [26].

Т а б л и ц а 1

Содержание химических элементов в пластах углей Подмосковского бассейна [24, 25]

Элемент	Содержание в пласте	Примечания
Сера общая (S)	4–7%	преобладает органическая и колчеданная сера
Углерод (C)	65–75%	низкая степень углефикации (бурый уголь)
Алюминий (Al)	1,5–5%	содержание в золе до 20%
Железо (Fe)	1–5%	в золе до 10%. пирит, сидерит, оксиды
Титан (Ti)	10–50 г/т	в виде рутила и ильменита
Никель (Ni)	10–50 г/т	–
Медь (Cu)	10–40 г/т	–
Свинец (Pb)	5–30 г/т	–
Мышьяк (As)	10–200 г/т (до 500 г/т)	ключевой токсичный элемент. ассоциирует с сульфидами (пирит)
Ванадий (V)	50–200 г/т	–
Хром (Cr)	30–150 г/т	–
Цинк (Zn)	20–100 г/т	–
Кобальт (Co)	5–20 г/т	–
Ртуть (Hg)	0,05–0,3 г/т	–
Олово (Sn)	1–10 г/т	–
Цезий (Cs)	1–5 г/т	–
Литий (Li)	10–50 г/т	–
Уран (U)	1–10 г/т	–
Церий (Ce)	20–80 г/т	–
Золото (Au)	0,5–3 г/т	–
Серебро (Ag)	0,1–0,5 г/т	–

Печорский угольный бассейн расположен в границах Республики Коми и Ненецкого автономного округа (входит в состав Архангельской области). Большая часть его территории расположена за полярным кругом, примыкая к западным склонам Полярного Урала и Пай-Хоя. Площадь бассейна свыше 90 тыс. км². Запасы угля составляют более 344 млрд т. Угли имеют разный состав – преобладают каменные, есть бурые и антрацит. Особая ценность угольных запасов – наличие коксующихся углей. Вещественно-петрографический состав представлен в основном (70–85%) микрокомпонентами группы витринита (табл. 2).

Донецкий угольный бассейн (Донбасс) – один из крупнейших угольных бассейнов Европы. Площадь бассейна около 60 тыс. км². Сум-

марные запасы до глубины 1800 м составляют 140,8 млрд т. В угленосной толще каменноугольного возраста до 300 пластов, средняя мощность рабочих пластов 0,6–1,2 м (табл. 3).

Формирование углей происходило в условиях прибрежно-морской обстановки, что обусловило высокое содержание серы и связанных с пиритом элементов (As, Hg, Se). Высокие значения давления и температуры при складкообразовании привели к формированию углей высоких марок (антрациты).

Угли Северной Азии характеризуются содержанием лантаноидов, сопоставимым со средней оценкой для углей США, хотя и несколько выше их. Различие обусловлено несколько более высокой средней зольностью изученных углей (18,4%) по сравнению с углями США (13,1%).

Т а б л и ц а 2

Содержание химических элементов в пластах углей Печорского угольного бассейна [27]

Элемент	Содержание	Примечания
Углерод (C)	85–94%	
Алюминий (Al)	1,0–4,0%	каолинит, гидрослюда
Железо (Fe)	0,5–3,0%	пирит (FeS ₂), сидерит (FeCO ₃)
Кальций (Ca)	0,2–1,5%	карбонаты (кальцит)
Титан (Ti)	0,05–0,2%	рутил, ильменит
Мышьяк (As)	1–15 г/т	–
Ванадий (V)	10–50 г/т	–
Никель (Ni)	5–20 г/т	–
Хром (Cr)	10–40 г/т	–
Свинец (Pb)	3–15 г/т	–
Цинк (Zn)	5–30 г/т	–
Медь (Cu)	5–20 г/т	–
Кобальт (Co)	2–10 г/т	–
Ртуть (Hg)	0,01–0,1 г/т	–
Литий (Li)	5–25 г/т	–
Уран (U)	0,5–5 г/т	–
Германий (Ge)	1–10 г/т	проявляется в виде локальных геохимических аномалий
РЗЭ (Ce, La, Nd)	50–150 г/т	–
Золото (Au)	0,5–3 г/т	–
Серебро (Ag)	0,05–0,5 г/т	–

Т а б л и ц а 3

Содержание металлов в угольной мелочи Воркутского ГПП [27]

Наименование малого элемента	Содержание элемента в шламах и отсевах шахт, г/т				
	Воркутинская	Северная	Центральная	Юнь-Яга	Воргашорская
Никель (Ni)	225	150	230	130	400
Кобальт (Co)	38	2	32	14	36
Титан (Ti)	3000	3000	1800	1200	2000
Ванадий (V)	470	180	320	200	420
Хром (Cr)	250	160	250	190	500
Молибден (Mo)	24	20	15	10	13
Галлий (Ga)	10	10	10	М 10	10,9
Медь (Cu)	150	80	110	80	120
Свинец (Pb)	38	16	45	14	7

Окончание табл. 3

Наименование малого элемента	Содержание элемента в шламах и отсевах шахт, г/т				
	Воркутинская	Северная	Центральная	Юнь-Яга	Воргашорская
Серебро (Ag)	–	2	–	–	–
Цинк (Zn)	15	9	11	10	не определен
Олово (Sn)	4	4	4	2	3
Бериллий (Be)	2,7	8	3	13	5
Иттербий (Yb)	4,4	7	5	1,3	5
Иттрий (Y)	44	70	50	13	50
Скандий (Sc)	15	5	15	12	7
Марганец (Mn)	1100	800	850	170	1400
Цирконий (Zr)	230	300		110	150
Стронций (Sr)	Б50	Б50	Б50	17	Б50
Барий (Ba)	2000	1000	1400	1000	2000
Вольфрам (W)	–	М 1	–	–	не определен
Ниобий (Nb)	105	М 1	1	–	1,5
Мышьяк (As)	25	30	20	20	не определен
Германий (Ge)	6,6	8	9	4	22
Висмут (Bi)	–	–	–	–	0,75
Лантан (La)	–	–	–	–	10

Т а б л и ц а 4

Средние содержания химических элементов в составе углей Донецкого угольного бассейна [28]

Элемент	Диапазон содержаний (в угольном пласте)	Формы нахождения и примечания
Зольность	10–30% (в среднем 15–25%)	обусловлена терригенными примесями и сульфидами
Сера общая	1,5–4,5% (местами до 6–8%)	преобладает пирит (FeS_2)
Углерод	90–95% (для антрацитов)	очень высокая степень метафоризма
Алюминий (Al)	1,5–5,0%	каолинит, гидрослюда
Железо (Fe)	1,0–5,0%	в основном в виде пирита (FeS_2)
Кальций (Ca)	0,1–1,0%	–
Титан (Ti)	0,1–0,4% (1000–4000 г/т)	рутил, ильменит
Мышьяк (As)	5–50 г/т (макс. до 100)	–
Ванадий (V)	20–80 г/т	–
Никель (Ni)	10–40 г/т	–
Хром (Cr)	20–60 г/т	–
Свинец (Pb)	5–25 г/т	–

Окончание табл. 4

Элемент	Диапазон содержаний (в угольном пласте)	Формы нахождения и примечания
Цинк (Zn)	10–50 г/т	–
Медь (Cu)	10–40 г/т	–
Кобальт (Co)	5–20 г/т	–
Ртуть (Hg)	0,05–0,5 г/т (макс. до 1)	повышенные содержания. ассоциирует с пиритом и киноварью
Литий (Li)	10–40 г/т	–
Уран (U)	1–10 г/т	фоновые значения
Торий (Th)	5–15 г/т	–
Германий (Ge)	1–10 г/т (макс. до 15)	локальные аномалии
Галлий (Ga)	5–20 г/т	повышенные содержания
РЗЭ (□)	60–200 г/т	–
Церий (Ce)	20–70 г/т	–
Золото (Au)	1–20 г/т (макс. в зонах нарушений)	наиболее перспективный элемент
Серебро (Ag)	0,1–2,2 г/т	поведение сходно с золотом
Палладий (Pd)	< 1–5 г/т	–

В пересчете на золу сумма изученных семи РЗЭ (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии и США близки (283 и 278 г/т соответственно). Полученные оценки выше среднемировых данных для углей и золы угля [29] (табл. 4).

С уменьшением возраста сильно падает среднее содержание редкоземельных элементов (от 150 до 25 г/т), а также существенно уменьшается зольность угля.

Ленский угольный бассейн расположен в Республике Саха (Якутия) и частично в Красноярском крае. Площадь около 600 тыс. км². Общие геологические ресурсы углей бассейна составляют 1647 млрд т, из них бурых 945 млрд т, остальные – каменные. Основные разведанные месторождения: Кангаласское, Сангарское, Джебарики-Хайское, Кемпендяйское, Кировское [30, 31].

Один из парадоксальных фактов в геохимии природных углей – исключительно высокая зольность. До 40–55% массы извлекаемого угольного материала составляют соли и оксиды металлов, при этом металлы гомогенно распределены по массе и объему образцов угля. Можно предположить существование, по крайней мере, двух механизмов насыщения углей металлами:

1) осаждение солей металла из морской воды на матрице биомассы растений в процессе эволюции месторождения.

2) насыщенная металлами биомасса растений в результате роста растения на соответствующей геососнове с переносом металлов в биомассу растущих растений по механизму фитомайнинга.

Вероятно, в зависимости от природных условий оба процесса насыщения углей могут иметь место.

О чрезвычайно большой роли фитомайнинга свидетельствуют нижеперечисленные факты.

1. Содержание металлов в углях сильно превышает их содержание в морской воде. В качестве иллюстрации можно рассмотреть золото. Концентрация золота в угле достигает ~20 г/т (Донецкий бассейн), концентрация золота в морской воде составляет ~20 мкг/т, что в миллион раз меньше, т.е. для формирования одной тонны углеродного материала с насыщением его металлами необходимо осадить 105–106 м³ морской воды.

2. Многие угольные месторождения характеризуются практически отсутствием серы. Как известно, морская вода содержит в качестве основного солевого компонента сульфаты. Часто месторождения угля локализируются в горных

Т а б л и ц а 5

Содержание редкоземельных элементов в углях Северной Азии [29]

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A ^d , %	Содержание элементов, г/т							La/Yb
			La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	
Сибирский регион										
Угли девонского возраста										
Барзасское	14	32,5	35±11	68±19	5,4±1,7	1,7±0,4	0,7±0,2	1,5±0,2	0,31±0,06	23,3
Убруское	6	49,2	38±11	79±12	17,8±2,7	6,9±0,9	3,1±3,1	5,7±0,4	1,3±0,1	6,7
<i>Среднее</i>	<i>20</i>	<i>40,85</i>	65±11	70±18	7,5±1,9	2,5±0,5	1,1±0,2	2,2±0,2	0,48±0,1	<i>16,4</i>
Угли карбон-пермского возраста										
Гордовский	24	7,0	8,2±1,4	21±2,7	1,8±0,2	0,39±0,06	0,19±0,04	0,77±0,15	0,18±0,03	10,6
Кузнецкий	1394	13,5	12,3±0,6	24,7±0,9	2,6±0,1	0,64±0,03	0,43±0,03	1,3±0,05	0,34±0,06	9,5
Минусинский	801	16,4	13,2±2	29±5,8	2,1±0,3	0,62±0,1	0,45±0,08	1,18±0,16	0,34±0,09	11,2
Тунгусский	206	12,8	9,2±2,2	21,1±5,8	1,9±0,6	0,47±0,08	0,37±0,1	0,88±0,14	0,21±0,06	10,5
Таймырский	55	24,4	14,5±1,1	33,7±2,4	2,4±0,2	0,58±0,05	0,43±0,04	1,4±0,1	0,2±0,02	10,4
Курайское	12	25,2	38,2±7,5	44,1±7,9	4,8±0,7	1,5±0,2	0,75±0,11	2±0,3	0,5±0,1	19,1
<i>Среднее</i>	<i>2492</i>	<i>16,6</i>	11,5±1,2	25,9±2,4	2,2±0,2	<i>0,54±0,05</i>	<i>0,37±0,05</i>	<i>1,11±0,12</i>	<i>0,25±0,04</i>	<i>10,4</i>
Угли мезозойского возраста										
Пыжинское	6	6,5	4,9±1,8	5,8±2,1	1±0,35	0,5±0,2	0,23±0,06	0,54±0,2	0,17±0,06	9,1
Канско-Ачинский	563	10,2	3,4±0,4	8,5±1,2	0,79±0,13	0,31±0,05	0,21±0,04	0,45±0,07	0,1±0,02	7,6
Иркутский	129	14,3	12,7±1,6	27,7±2,5	3,4±0,5	0,54±0,14	0,54±0,12	2±0,3	0,28±0,05	6,4
Улуг-Хемский	45	9,3	4,3±0,7	8,2±1,4	1±0,2	0,34±0,06	0,19±0,04	0,4±0,07	0,11±0,01	10,8
Западно-Сибирский	159	10,7	8,1±0,8	15,6±1,5	2,2±0,2	0,7±0,06	0,49±0,04	1,7±0,2	0,39±0,03	4,8
Тунгусский	33	12,6	5,1±0,6	6,7±1,0	0,9±0,1	0,49±0,11	0,25±0,05	0,4±0,06	0,1±0,02	12,8
Олонь-Шибирское	40	15,2	10,1±0,9	24,6±1,7	1,81±0,13	0,37±0,03	0,28±0,03	0,89±0,06	0,12±0,009	11,3
Тагауровское	31	11,6	2,7±0,8	6,9±1,8	0,46±0,16	0,09±0,05	0,06±0,02	0,33±0,08	0,043±0,011	8,2
Тарбагатайское	34	10,7	4,6±0,7	11,3±1,5	0,79±0,16	0,16±0,03	0,14±0,03	0,48±0,08	0,073±0,013	9,6
Зашуланское	17	7,4	3±1,6	8±3,2	0,6±0,26	0,12±0,04	0,07±0,02	0,43±0,09	0,060±0,014	7,0
Харанорское	41	10	3,8±1,0	10,7±2,0	0,67±0,18	0,091±0,018	0,1±0,02	0,35±0,07	0,055±0,009	10,9
Загустайское	12	17,2	13,6±3,0	28,1±5,7	2,5±0,5	0,47±0,11	0,31±0,07	1,14±0,2	0,150±0,027	11,9
Бургуйское	18	9,5	4,7±0,7	13,6±1,6	1,05±0,13	0,22±0,04	0,15±0,03	0,51±0,06	0,076±0,009	9,2
Окино-Ключевское	11	17,9	16,3±2,6	39,3±5,1	2,9±0,4	0,64±0,09	0,31±0,03	0,93±0,09	0,140±0,015	17,5
<i>Среднее</i>		<i>11,65</i>	6,9	15,7	1,3					

Примечание: A^d(%) – зольность.

районах, далеких от возможных взаимодействий с «классическими» морскими регионами.

Представляют значительный интерес наблюдения зависимости содержания металлов от возраста углей. В табл. 5 приведены данные о содержании редкоземельных металлов в углях Северной Азии. В среднем угли девонского возраста (~350 млн лет) содержат ~145 г/т РЗЭ (суммарное содержание La, Ce, Sm), угли карбон-пермского возраста (~250 млн лет) содержат ~40 г/т РЗЭ, угли мезозойского возраста (~80 млн лет) содержат ~23 г/т РЗЭ. Данные представлены на рис. 8 (сравним динамический характер процесса с теоретическими результатами, представленными на рис. 7). Совокупность приведенных фактов говорит о том, что фитомайнинг растений может играть важную роль в геогенезе угольных месторождений и позволяет сделать ряд практических выводов.

1. Подмосковский бассейн характеризуется высокими концентрациями токсичных элементов (As, Hg), а также V, Ni, что связано с морскими условиями осадконакопления и влиянием докембрийских пород. Это делает его золошлаковые отходы не только потенциальным источником перечисленных металлов, но и опасным источником загрязнения.

2. Печорский и Донецкий бассейны демонстрируют потенциал по извлечению широко-

го спектра элементов, включая редкоземельные металлы, германий и благородные металлы (Au, Ag). Особенно перспективны техногенные месторождения (отвалы, хвосты), где содержание элементов многократно возрастает.

3. Угли Сибири (Кузнецкий, Канско-Ачинский, бассейны Якутии) являются наиболее комплексными и богатыми. Кузнецкий бассейн выделяется высокими концентрациями Sc, Ga, Li, РЗЭ в золах. Южно-Якутский бассейн – один из самых перспективных по содержанию германия и скандия. Ленский бассейн также обладает значительным редкометалльным потенциалом.

4. Угли Урала и Донецкого бассейна содержат аномалии благородных металлов (Au, Pt, Pd).

Заключение

Функционирование биосистем в течение больших периодов времени, безусловно, оказывает влияние на природу глобальных геохимических процессов. Некоторые эффекты био-воздействия хорошо известны и их проявления являются общепринятыми. Примерами могут служить процессы изменения атмосферы за счет фотосинтеза (накопление кислорода), формирования почвенного покрова планеты микроорганизмами. Последнее десятилетие большое внимание начинает привлекать явление фитомайнинга – концентрирование растениями тяжелых

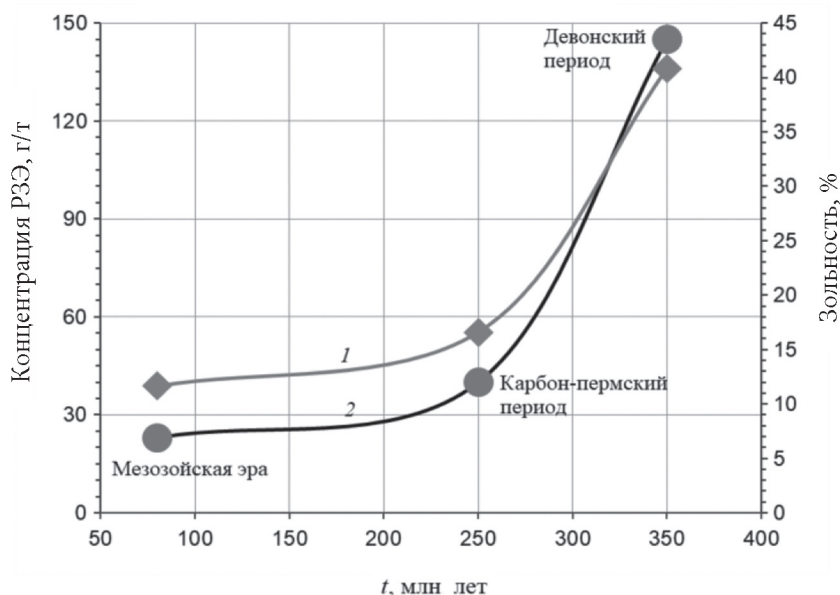


Рис. 8. Зависимость зольности (1) и содержания редкоземельных металлов (2) в природных углях от возраста углей (данные табл. 5)

металлов. Фитомайнинг – потенциальная основа новых технологических процессов.

Кинетическое моделирование – эффективный метод, обеспечивающий понимание сложных химических и биохимических явлений. В работе представлены кинетические модели фитомайнинга и проведена верификация двухкамерного процесса на основе экспериментальных данных. Явление фитомайнинга объясняет природу такого сложного геохимического процесса, как насыщение природных углей тяжелыми металлами. Минерализация (зольность) углей на угольных месторождениях достигает 45%, при этом все месторождения демонстрируют наличие всего спектра металлов таблицы Менделеева. Предлагаемый в статье генезис этого явления включает следующие стадии:

1) рассеивание металлов за счет вулканической деятельности в периоды формирования земной коры («всюдность» золота по В.И. Вернадскому);

2) вегетация «древних» растений в течение очень больших периодов времени (сотни и тысячи миллионов лет), функционирование явления концентрирования и накопление металлов;

3) карбонизация биоматериалов (удаление водной составляющей углеводов) в условиях баротермического сжатия. Фитомайнинг способен обеспечить существенную часть «металлических» составляющих природных углей. Гипотеза представляется обоснованной, однако требует дальнейшего подтверждения петрографическими и минералогическими данными.

Кинетическое моделирование позволяет дать оценки кинетических параметров процессов, прогнозировать динамику развития событий как в пределах вегетационного цикла, так и в режимах геоисторического развития. Результатом накопления металлов в природных углях является концентрирование металлических составляющих в зольных отходах угольных электростанций, что может представлять технологический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leitenmaier B., Küpper H. // *Front. Plant Sci.* 2013. 4 (374). 1–13 (DOI: 10.3389/fpls.2013.00374).
2. Sun Y., Zhou Q., Diao C. // *Bioresour. Technol.* 2008. 99. 1103–1110 (DOI: 10.1016/j.biortech.2007.02.035).
3. Baker A.J. M., Brooks R.R. // *Biorecovery.* 1989. 1. 81–126 (DOI: 10.1080/01904168109362867).
4. Sheoran V., Sheoran A. S., Poonia P. // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2011. 41. 168–214 (DOI:10.1080/10643380902718418).
5. Anderson C.W.N., Brooks R.R., Stewart R.B., et al. // *Nature.* 1998. 395. 553–554 (DOI: 10.1038/26875).
6. Msuya F.A., Brooks R.R., Anderson C.W.N. // *Gold Bull.* 2000. 33. 134–137 (DOI: 10.1007/BF03215491).
7. Lamb A.E., Anderson C.W.N., Haverkamp R.G. // *Chem. N.Z.* 2001. 65 (2). 34–36.
8. Haverkamp R.G., Marshall A.T., Van Agterveld D. // *J. Nanoparticle Res.* 2007. 9. 697–700 (DOI: 10.1007/s11051-006-9198-y).
9. Piccinin R.C., Ebbs S.D., Reichman S.M., et al. // *Miner. Eng.* 2007. 20. 1327–1330 (DOI: 10.1016/j.mineng.2007.07.005).
10. Wilson-Corral V., Anderson C., Rodriguez-Lopez M., et al. // *Miner. Eng.* 2011. 24. 1488–1494 (DOI: 10.1016/j.mineng.2011.07.014).
11. Fuchs W.A., Rose A. W. // *Econ. Geol.* 1974. 69. 332–346 (DOI: 10.2113/gsecongeo.69.3.332).
12. Kothny E.L. // *Plant Soil.* 1979. 53. 547–550 (DOI: 10.1007/BF02140726).
13. Nemutandani T., Dutertre D., Chimuka L., et al. // *Toxicol. Environ. Chem.* 2006. 88. 175–185 (DOI: 10.1080/02772240600585842).
14. Aquan H.M. Phytoextraction of palladium and gold from Broken Hill gossan // PhD Thesis. Massey Univ. Manawātū. New Zealand. 2015. 104 pp.
15. Harumain Z.A.S., Parker H.L., Munoz García A. // *Environ. Sci. Technol.* 2017. 51. 2992–3000 (DOI: 10.1021/acs.est.6b04821).
16. Kinska K., Kowalska J. // *Plant Tissues.* 2019. 28. 1735–1740 (DOI: 10.15244/pjoes/89507).
17. Dinh T., Dobo Z., Kovacs H. // *Chemosphere.* 2022. 297. 134259 (DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134259).
18. Novo L.A.B., Castro P.M.L., Alvarenga P., et al. Phytomining of rare and valuable metals. In *Phytoremediation: management of environmental contaminants*. Ed. A. Ansari, S. Gill, R. Gill, G. Lanza, L. Newman, Springer Cham., 2017, p. 469–486 (DOI: 10.1007/978-3-319-52381-1_18).
19. Тимофеева С.С., Дроздова И.В. // ГИАБ. 2024. 7. 5–20 (DOI:10.25018/0236_1493_2024_7_0_5).
20. Anderson C., Moreno F., Meech J. // *Miner. Eng.* 2005. 18. 385–392 (DOI: 10.1016/j.mineng.2004.07.002).
21. Akinbile B.J., Makhubela B.C.E., Ambushe A.A. // *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2021. 103. 3913–3933 (DOI: 10.1080/03067319.2021.1917557).
22. Masinire F., Adenuga D.O., Tichapondwa S.M., et al. // *Chem. Eng. Trans.* 2022. 94. 1429–1434 (DOI: 10.33031/CEТ2294238).
23. Каплунов Д.Р., Качурин Н.М., Фридендер Г.В. и др. // *Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о земле.* 2019. № 4. С. 113.
24. Пономаренко Е.С. // *Литосфера.* 2011. № 3. С. 76.
25. Кетрис М.П., Яшченко И.Г. // *Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН.* 2014. 7. 22–26.
26. Барабошкина Т.А., Харькина М.А., Жигалин А.Д.

- Освоение минеральных ресурсов и динамика экологических функций абиотических сфер Земли (на примере месторождений Подмосковского бурогоугольного бассейна). М., 2015. 150 с.
27. Шувалов Ю.В., Нифонтова Т.И., Экгардт В.И. // ГИАБ. 2003. № 7. С. 95.
28. Хасанов Р.Р., Исламов А.Ф., Богомоллов А.Х. // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 34.
29. Арбузов С.И., Чекрыжов И.Ю., Сунь Ю. и др. // Геология и геофизика. 2016. 57 (6). 1205–1222.
30. Кузнецов П.Н., Колесникова С.М., Кузнецова Л.И. и др. // Химия твердого топлива. 2015. № 4. С. 3.
31. Соловьев Т.М., Шайхислам Г.Б., Эпштейн С.А. // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 253.

Информация об авторах

Сергей Дмитриевич Варфоломеев – директор Института физико-химических основ функционирования сетей нейронов и искусственного интеллекта химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, научный руководитель Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, чл.-корр. РАН, докт. хим. наук (sdvarf@sky.chph.ras.ru);

Кирилл Михайлович Соловьев – студент второго курса геологоразведочного факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (dorbrykot@yandex.ru);

Ирина Владимировна Гачок – ст. науч. сотр. химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (ivgachok@gmail.com).

Светлана Батожаргаловна Цыбенкова – вед. науч. сотр. лаборатории компьютерного моделирования биомолекулярных систем и наноматериалов Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (s.tsybenova@gmail.com).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 24.11.2025
Одобрена после рецензирования 22.12.2025
Принята к публикации 23.12.2025