



УДК 553.94.044:553.493.5.044(55)

## РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ УГЛЕЙ ИРАНА

В. И. Рыбалко, С. И. Арбузов

Проведена оценка редкометалльного потенциала углей Ирана. Оценено содержание широкого спектра редких металлов в 610 пробах углей и углевмещающих пород из 34 угольных месторождений страны. Выявлены отдельные угольные пласты и месторождения, характеризующиеся высокими, вплоть до промышленно значимых, содержаниями Sc, Ge, Au, Cu, V, REE. Промышленный интерес могут представлять угли, в которых наряду с основным компонентом (скандием) отмечаются повышенные концентрации одного или нескольких элементов.

**Ключевые слова:** уголь, Иран, редкометалльный потенциал, металлоносность углей, редкие металлы.

## RARE-METAL POTENTIAL OF IRAN'S COALS

V. I. Rybalko, S. I. Arbuzov

Rare-metal potential of Iran's coals has been estimated. Contents of a wide range of rare metals in 610 samples of coals and coal-bearing rocks from 34 coal deposits of Iran have been evaluated. Individual coal seams and deposits are characterized by high contents of Sc, Ge, Au, Cu, V, and REE up to commercially important values. Coals contained higher concentrations of one or more elements together with Sc may present commercial interest.

**Keywords:** coal, Iran, rare-metal potential, metal content in coal, rare metal.

Уголь является биогенной горючей горной породой, в состав которой наряду с органической частью (C, O, H, N и S) входят также неорганические компоненты, главным образом золообразующие элементы (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K) и второстепенные элементы или элементы-примеси (обычно не более 1 % от общей массы всего неорганического вещества). Среди этих второстепенных элементов в значительных количествах могут накапливаться как ценные, так и экологически опасные элементы-примеси. В связи с этим угольные месторождения можно рассматривать в качестве источника не только топлива для энергетики, но и ценных металлов, преимущественно редких и благородных. В последние десятилетия работы по исследованию редкометалльных углей активизировались и в настоящее время ведутся в различных странах мира [1, 4, 7]. Рост добычи и уровня потребления углей в Иране обусловил необходимость проведения таких исследований в этой стране.

В Иране выделены Табасский и Эльбурсский угольные бассейны, а также несколько угленосных районов (рис. 1). Общие ресурсы углей в стране составляют около 34 млрд т, угли триас-юрского возраста, марка – от газовых до антрацитов [2]. Формирование угольных бассейнов и угленосных районов происходило в различных геодинамических обстановках. Отличительной особенностью углей Ирана по сравнению со многими другими регионами мира являются нестабильные тектонические условия формирования, в результате чего образовались пласты малой мощности и часто с углями высокой зольности. До настоящего времени металлоносность углей Ирана не изучалась.

Эпизодические данные по геохимии углей приводятся в отдельных статьях в виде результатов анализов единичных проб из некоторых угольных месторождений Ирана [8, 10].

Оценка редкометалльного потенциала углей – комплексная проблема, требующая решения множества разнообразных задач. Наиболее важные из них – это получение достоверной информации о содержании элементов-примесей в угольных пластах, месторождениях и бассейнах, а также оценка условий накопления элементов-примесей.

Для их решения проведены масштабные геолого-геохимические работы по изучению угольных объектов Ирана, включающие отбор проб углей, углевмещающих пород и продуктов переработки углей и последующие аналитические исследования. В качестве количественных методов анализа использовались рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), масс-спектрометрический анализ с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS). Работы выполнены в аккредитованных лабораториях Томска и Новосибирска. Всего было изучено 34 угольных объекта и 610 проб из них.

С целью выявления редкометалльных углей в Иране были средние содержания элементов-примесей в отдельных пластах, месторождениях, угленосных районах и угольных бассейнах. Расчет среднего производился методом средневзвешенного от содержаний в частных пробах к единицам более высокого порядка (месторождения, бассейны).

Установлено, что угли Ирана по сравнению с угольным кларком [9] обогащены литофильными

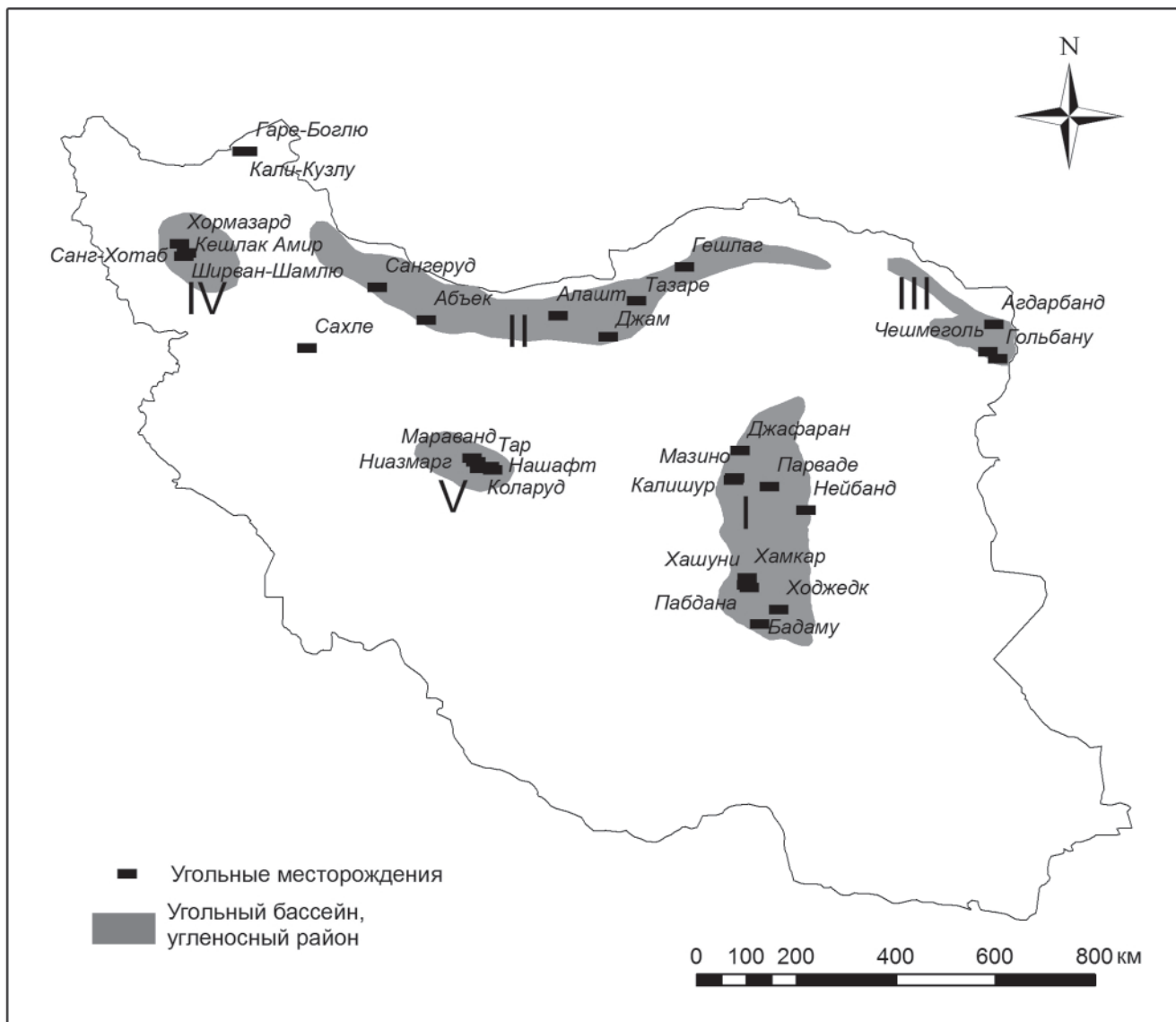


Рис. 1. Схема расположения изученных угольных месторождений на территории Ирана:

Угольные бассейны: I – Табасский, II – Эльбурсский; угленосные районы: III – Северо-Хорасанский, IV – Мерагинский, V – Кашан-Исфаханский

ми (Li, V, Mn, Br, Rb, Cs, Ba, Sm, Eu, Tb, Yb, Th), халькофильными (Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb) и сидерофильными (Sc, Cr, Co, Ni, Mo) элементами (рис. 2), но отличаются пониженными содержаниями Be, B, Ge, Zr, Hf, Nb, Ta, U, Au, Sb, Tl и легких лантаноидов (La, Ce, Nd). Содержания отдельных элементов в углях ниже предела обнаружения аналитических методов и рядовые, однако в то же время отмечаются и возможно промышленно значимые концентрации элементов-примесей. Из большой группы исследуемых элементов практический интерес могут представлять Sc, Ge, Au, Cu, V, REE.

Скандий является одним из самых дорогих редких металлов, объем его производства весьма мал, чаще всего его получают попутно из скандий-содержащих руд месторождений других полезных ископаемых.

Выделяется несколько геолого-промышленных типов скандийсодержащих месторождений,

в том числе угольный. В последних содержания Sc, определяющие минимальную возможную промышленную значимость, в публикациях приводятся разные. По данным [6], это 10 г/т, в золе углей 50 г/т; по В. В. Середину [5], «кондиционным» рекомендуется принимать концентрацию Sc в золе угля 100 г/т. Но в отдельных случаях отмечаются и более низкие содержания, при которых скандий можно было бы рентабельно извлекать [4]. Ориентируясь на представленные минимальные содержания, определяющие возможную промышленную значимость, в Иране можно выделить несколько угольных объектов, перспективных на извлечение скандия.

Одним из наиболее перспективных объектов на извлечение скандия является месторождение Тазаре Эльбурсского угольного бассейна (см. таблицу). Наиболее высокими средними содержаниями скандия характеризуются угольные пласты  $K_{17}$  и  $p_{10}$  с концентрациями 273 и 114 г/т в золе со-

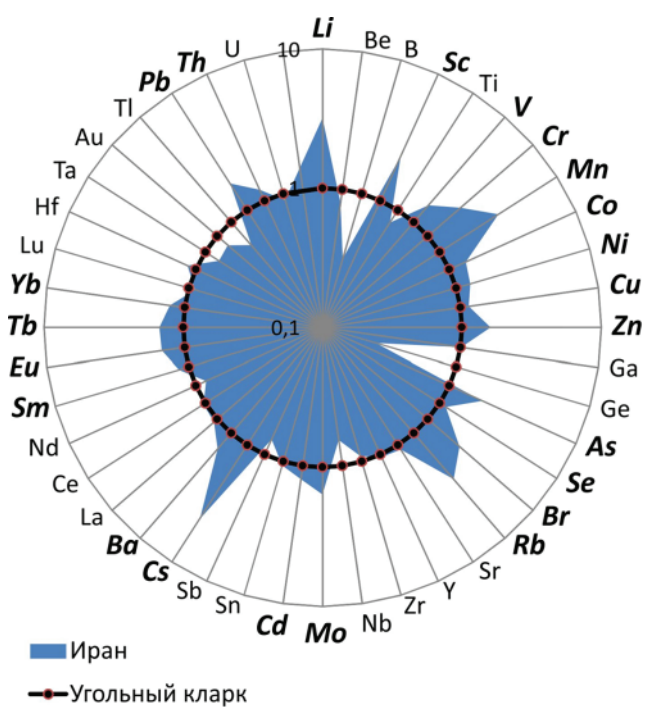


Рис. 2. Диаграмма средних содержаний элементов-примесей в углях Ирана, нормированных к угольному кларку [9]

ответственно при среднем содержании Sc в золе углей месторождения 63,3 г/т. Ресурсный потенциал скандия здесь достаточно велик.

Учитывая запасы углей месторождения Тазаре по категории В+С (116,7 млн т) и годовую добычу около 500 тыс. т по данным на 2007 г., можно оценить в них ресурсы скандия по категории Р<sub>1</sub> на уровне 1500 т [3]. Учитывая, что ориентировочная минимальная стоимость 1 кг Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 600 дол. США, можно утверждать: угли месторождения Тазаре представляют значительный экономический интерес.

В Эльбурсском угольном бассейне наряду с Тазаре перспективны на скандий могут быть и другие месторождения. В углях месторождения Гешлаг выявлены отдельные аномалии с содержаниями скандия в золе углей до 220 г/т. Обогащен им пласт k<sub>4</sub>, в котором среднее содержание металла в золе составляет 121 г/т. Угли месторождения Сангеруд также характеризуются повышенными содержаниями скандия в золе углей (70 г/т, в отдельных пробах до 159 г/т). Аномальные концентрации отмечаются и в месторождении Алашт: при среднем содержании скандия в золе углей 49 г/т в отдельных пробах оно достигает 250 г/т.

Обогащенные скандием угли отмечаются и в других бассейнах и угленосных районах Ирана. В Табасском бассейне единичные аномалии в золе отмечаются на месторождениях Ходжедк (140 г/т), Хамкар (177 г/т), Мазино (141 г/т), Бадаму (112 г/т), Нейбанд (106 г/т). В Северо-Хорасанском угленосном районе скандием обогащены угли месторождения Гольбану (в отдельных пробах до 198 г/т).

Содержание скандия в углях и золах углей различных пластов месторождения Тазаре

Угольный пласт	Зольность, %	Содержание Sc, г/т	
		в угле	в золе
k <sub>5</sub>	4,4	3,3	75,0
k <sub>10</sub>	32,3	15,4	47,7
k <sub>12</sub>	37,5	17,8	47,5
k <sub>17</sub>	7,0	19,1	273
k <sub>25</sub>	41,1	18,9	46,0
p <sub>7</sub>	16,7	13,6	81,4
p <sub>10</sub>	4,9	5,6	114
Среднее	21,8	13,8	63,3

В некоторых случаях в углях и золах углей месторождения выделяется не один элемент, а их комплекс, в том числе в промышленных концентрациях, как, например, германий. Такие угли с промышленно значимыми концентрациями Ge и Sc отмечаются в различных бассейнах Сибири [1].

Определение содержаний германия в углях Ирана производилось методом ICP MS, в золах углей – методом РФА. Данные методики предполагают нагревание проб до температур 500 и 960 °С соответственно. В последнем случае значительная часть германия может переходить в летучие соединения и не фиксироваться. Предел обнаружения Ge методом РФА составляет 20 г/т при среднем содержании в золах каменных углей мира 18 г/т [9]. Даже при вероятных потерях германия при нагревании проб отмечаются аномально высокие его содержания в золе углей трех месторождений Эльбурсского угольного бассейна. На месторождении Сангеруд в двух пробах зола из низкозольных углей установлены содержания германия 326 и 323 г/т; на месторождении Гешлаг также в двух пробах зола из низкозольных углей – 254 и 219 г/т; единичная проба из месторождения Алашт с зольностью угля 4,7 % содержит 155 г/т Ge в золе. Содержание скандия в тех же пробах более 100 г/т. Минимальное содержание германия, определяющее возможную промышленную значимость, в золе углей, по данным [6], составляет 150 г/т, по данным В. В. Середина [5] – 300 г/т.

Обнаруженные германий-скандиевые промышленно значимые концентрации позволяют сделать оптимистичный прогноз на выявление здесь комплексных редкометалльных руд в углях.

В углях с высокими содержаниями скандия в отдельных месторождениях отмечаются повышенные концентрации золота, меди, ванадия, кобальта, редкоземельных элементов. Для углей месторождения Гольбану наряду с высокой золотоносностью (до 5 г/т в золе углей) характерны высокие содержания скандия (до 198 г/т в золе в отдельных пробах). Подобная особенность характерна и для углей месторождения Тазаре, где в обогащенных скандием углях в частных пробах отмечаются высокие содержания золота (до 122 мг/т), а содержание ванадия здесь в отдель-



ных пробах достигает 0,2 %, что на порядок больше зольного кларка ванадия для каменных углей. В месторождениях Сангеруд, Тазаре, Гешлаг, Хамкар отмечаются концентрации кобальта, также превышающие минимальные для возможно промышленно значимых [6]. Кроме того, аномально высокие содержания редкоземельных элементов наряду со скандием установлены в месторождениях Гешлаг, Тазаре, Алашт Эльбурсского бассейна, Гольбану, Чешмеголь Северо-Хорасанского угленосного района и месторождения Хамкар Табасского бассейна.

Таким образом, в углях Исламской республики Иран можно прогнозировать обнаружение нескольких типов редкометалльных концентраций. Возможно, промышленно значимыми могут являться месторождения, в которых наряду с основным полезным компонентом – скандием – отмечаются и повышенные содержания одного или нескольких элементов (германия, ванадия, кобальта, меди, золота, редких земель).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арбузов, С. И.** Геохимия редких элементов в углях Сибири [Текст] / С. И. Арбузов, В. В. Ершов. – Томск : Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. **Геология** и полезные ископаемые зарубежных стран. Вып. 1. Минерально-сырьевая база Ирана (твердые полезные ископаемые) [Текст] / под ред. В. П. Орлова. – М. : ВНИИзарубежгеология, 1993. – 300 с.
3. **Инструкция** по изучению и оценке попутных твердых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев [Текст]. – М. : Наука, 1987. – 136 с.
4. **Перспективы** освоения минерально-сырьевой базы и развития производства скандия в России и других странах СНГ [Текст] / Л. З. Быховский, В. В. Архангельская, Л. П. Тигунов, С. И. Ануфриева // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 5. – С. 27–32.
5. **Угольная** база России. Т. VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России [Текст] / гл. ред. В. Ф. Череповский. – М. : ООО «Геоинформмарк», 2004. – 779 с.
6. **Ценные** и токсичные элементы в товарных углях России: Справочник [Текст] / под ред. В. Ф. Череповского, В. М. Рогового и В. Р. Клера. – М. : Недра, 1996. – 238 с.
7. **Юдович, Я. Э.** Ценные элементы-примеси в углях [Текст] / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2006. – 538 с.
9. **Yazdi, M.** Dual-energy gamma-ray technique for quantitative measurement of coal ash in the Shahroud mine, Iran [Text] / M. Yazdi, S. A. Esmailnia // Int. J. Coal Geol. – 2003. – Vol. 55. – P. 151–155.
9. **Ketris, M. P.** Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals [Text] / M. P. Ketris, Ya. E. Yudovich // Int. J. Coal Geol. – 2009. – Vol. 78. – P. 135–148.
10. **Yazdi, M.** Geochemical properties of coals in the Lushan coal field of Iran [Text] / M. Yazdi, S. A. Esmailnia // Int. J. Coal Geol. – 2004. – Vol. 60. – P. 73–79.