

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПОМОРФНЫЕ АССОЦИАЦИИ  
МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В УГЛЕРОДИСТЫХ ПОРОДАХ КИМКАНСКОГО  
РУДОПРОЯВЛЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК)**

**А.И. Ханчук<sup>1</sup>, И.Ю. Рассказов<sup>2</sup>, Т.Н. Александрова<sup>2</sup>, В.С. Комарова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159,  
г. Владивосток, 690022, e-mail: khanchuk@hq.febras.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Институт горного дела ДВО РАН, ул. Тургенева 51, г. Хабаровск, 680000, e-mail: adm@igd.khv.ru,  
igd@rambler.ru

<sup>3</sup>ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск,  
680000, e-mail: Komarova@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 5 декабря 2011 г.

В статье представлены результаты минералого-технологических исследований углеродистых пород кимканского рудопроявления благородных металлов, на основе которых выявлены, с применением методов математической статистики, новые типоморфные ассоциации микроэлементов.

**Ключевые слова:** углеродистые породы, обогащение, микроэлементы, флотация, статистические критерии, Дальний Восток.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Проблема комплексного освоения минеральных ресурсов, одной из составных частей которой является выявление влияния форм соединений элементов в сырье и в продуктах его переработки, является одной из актуальных и приоритетных, направленной на осуществление процессов их экологически безопасного освоения. В связи с истощением запасов благородных металлов на месторождениях традиционного типа в XXI веке ведущую роль начинают играть крупнообъемные месторождения, локализованные в черносланцевых толщах, пригодных для открытой отработки [1, 3, 7].

Термином “типоморфные ассоциации микроэлементов (МЭ)” описываются совокупности элементов, концентрация которых в полезных ископаемых, продуктах их добычи или обогащения (гравитация, флотация и др.) либо выше фоновых значений, т. е. средних содержаний в полезных ископаемых, либо равна или выше содержаний, представляющих интерес для производства их товарных соединений из рудного сырья [8, 9]. Различают природные ( $Q_n$ ) и технологические ( $Q_t$ ) ассоциации элементов, т. е. в исходных рудах и в продуктах их переработки. Я.Э. Юдович [9] предложил называть элементы “ти-

поморфными”, если их содержание в золе углеродистых пород превышает кларк осадочных пород. Данный термин использован в настоящей работе и для классификации МЭ в сланцах.

Известен факт одновременного обогащения углеродистых пород несколькими микроэлементами, которые в других условиях значительно различаются химическими свойствами. Многие авторы пытались выявить геохимические ассоциации микроэлементов в углеродистых породах [5, 10–12]. Однако ими получены во многом противоречивые данные, что объясняется, вероятно, не только многофакторностью процессов накопления, но и причинами методического характера. Ряд исследователей или вообще не пользуются методами корреляционного анализа или некорректно трактуют полученные результаты. Очевидно, совокупность аналитических данных о содержании МЭ позволяет сделать заключение о существовании корреляционной зависимости между содержаниями двух (или нескольких) из них, если рассчитанный коэффициент корреляции ( $r$ ) больше табличного при уровне значимости не менее 0.95.

На Дальнем Востоке потенциально платиноносные высокоуглеродистые сланцы распространены в рифей-палеозойском обрамлении Сибирской плат-

формы, в Южно-Верхоянской складчатой зоне, в Селмджино-Кербинской и Ниланской структурно-формационных зонах Амуро-Охотской складчатой системы и в позднедокембрийских-кембрийских окраинных прогибах Буреинского массива. Нами изучены углеродсодержащие сланцы кимканской толщи Буреинского массива (рис. 1), где электронно-микроскопическими исследованиями и гравитационно-флотационными методами обогащения установлена тонкодисперсная золото-платиноидная минерализация [6].

Кимканская толща по литологическим признакам подразделена на две подтолщи: нижнюю кремнисто-терригенную и верхнюю терригенную. Нижняя подтолща представлена глинистыми и кремнисто-глинистыми, часто углеродистыми сланцами, фтанитами, алевролитами, песчаниками, известняками, доломитами, яшмовидными кремнистыми породами, риолитами, гематитовыми и магнетит-гематитовыми рудами, общей мощностью 900–1070 м. Верхняя подтолща сложена песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами с прослоями фтанитов, известняков, туфов, риолитов и базальтов, общей мощностью 800–900 м. Содержание углеродистого вещества, переходящего местами в графит за счет контактового метаморфизма, достигает 3–9, реже 12–25 %. В углеродистых разновидностях часто содержится рассеянная сульфидная (пирит, пирротин) минерализация.

Основной целью исследований являлось выявление типоморфных природных и технологических ассоциаций микроэлементов в углеродистых породах Кимканского рудопоявления на основе минералогическо-технологических исследований с применением методов математической статистики для обоснования эффективных методов обогащения.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовка технологических проб к обогащению включала операции дробления, сокращения и отбора навесок для технологических исследований и различных анализов. Обогащаемость материала изучали по четырехстадийной технологической схеме, включающей отсадку, центробежную концентрацию, доводку на концентрационном столе узкокласифицированных фракций и флотацию. Отсадку материала крупностью  $-2+0$  мм осуществляли в диафрагмовой машине «Омск». Продукты обогащения подвергали минералогическому анализу, а подрешетный продукт ( $-0.1$  мм) – дополнительному концентрированию на столе с просмотром головок и концентратов под биноклем. На 2-й стадии хвосты отсадки и 1 и 2 верхние слои камерного надрешетного продукта после доизмельчения ( $-1.0+0.0$ ) поступали на 3 стадию обогащения с доводкой подрешетного продукта

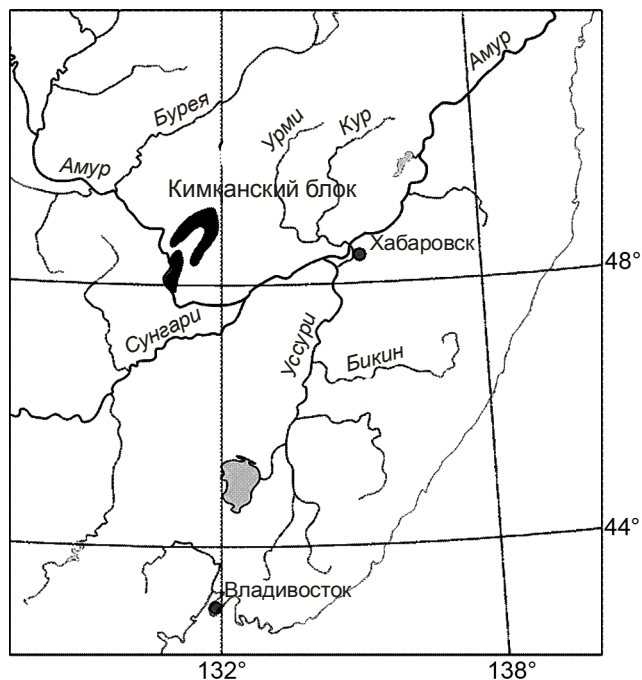


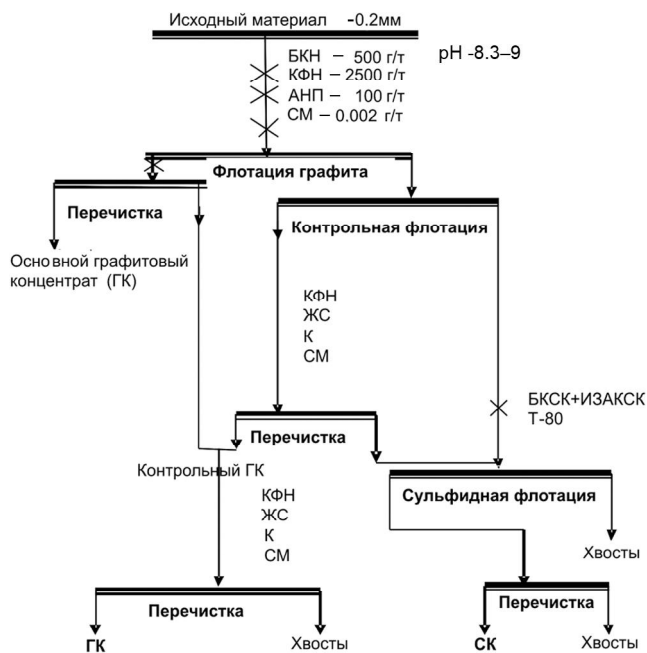
Рис. 1. Географическое положение Кимканской толщи.

на концентрационном столе, хвосты отсадки и 1 и 2 верхние слои камерного надрешетного продукта доизмельчались ( $-0.5+0.0$ ) и концентрировались на центробежном концентраторе Knelson (KN) с доводкой концентратов и хвостов центробежной концентрации на столе. На 4-й стадии обогащения хвосты KN и хвосты гравитационного стола обесшламливались в гидроциклоне, пески гидроциклона дополнительно концентрировали, а хвосты подвергали флотации. Шламы гидроциклона флотировались отдельно.

Для выявления возможности селективной флотации тонкого золота использовали бутиловый и изоамиловый ксантогенаты и вспениватель Т-80 (рис. 2). Флотационное извлечение углеродсодержащих продуктов проводили с использованием длинноцепочных аминов, керосина, кремнефтористого натрия и соснового масла в различных рН-средах, создаваемых известью и серной кислотой.

Анализ продуктов обогащения выполнялся атомно-абсорбционным и рентгенофлуоресцентным методами. Минералогическо-петрографические исследования исходных образцов и продуктов обогащения проводились с использованием оптических методов [11] и электронно-микроскопических с рентгено-спектральным микроанализом (РЭМ-РСМА).

При изучении особенностей микроструктуры образцов использовались спектроскопические методы: инфракрасная (ИК)-спектроскопия и спектороскопия комбинационного рассеяния света (КР или рамановская спектроскопия). ИК спектры регистри-



**Рис. 2.** Схема флотационного обогащения высокоуглеродистых пород.

БКН –  $\text{NaHCO}_3$ , КФН –  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , АНП – собиратель на основе нитропарафинов, СМ – сосновое масло, К – керосин, БКСК – бутиловый ксантогенат калия, ИЗАКСК – изоамиловый ксантогенат калия, ГК – графитовый концентрат, СК – сульфидный концентрат, ЖС – жидкое стекло.

ровались на спектрометре IFS66V, оснащенный ИК микроскопом Nipreigon, параметры регистрации: спектральное разрешение –  $4 \text{ см}^{-1}$ , спектральный диапазон –  $600\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ . Регистрировались спектры отражения с пространственным разрешением  $50\text{--}100 \text{ мкм}$ . КР спектры регистрировались на спектрометре Senterra с возбуждением красным и зеленым лазерами (785 и 540 нм, соответственно), параметры регистрации: спектральное разрешение –  $4\text{--}8 \text{ см}^{-1}$ , пространственное разрешение –  $20\text{--}50 \text{ мкм}$  (ИОХ им. Зелинского, г. Москва).

Экспериментальные данные обрабатывались с применением многофакторного дисперсионного анализа и Newman–Keuls test. Цель обработки – определение факта наличия или отсутствия различий между наблюдаемыми выборками данных (или вариационными рядами) и выявление статистически значимых различий между ними [4]. Критерий Newman–Keuls вычислялся по формуле:

$$q = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{\frac{S_{\text{вн}}^2}{2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

где  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  – оценка математического ожидания (среднего) 1-ой и 2-ой выборок;  $S_{\text{вн}}^2$  – внутригрупповая дисперсия;  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок.

Использовался пакет прикладных программ GeoStat. Вычисленное значение сравнивается с критическим значением, которое зависит от задаваемого уровня значимости  $\alpha$ , числа степени свободы  $k = N - m$  ( $N = \sum n_i$  – численность всех выборок;  $m$  – число выборок).

### ХИМИЧЕСКИЙ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ

Для анализа минеральных ассоциаций и состава вмещающих пород была отобрана технологическая проба (70 кг) из коренного обнажения карьера строящегося Кимкано-Сутарского ГОКа, которая характеризуется разрезом мощностью 5–6 м.

Химический состав (рис. 3) и микроэлементы (табл. 1) определены на рентгенофлуоресцентном сканирующем спектрометре S4 Pioneer.

Изучение вещественного состава технологической пробы выполнено с целью выявления благороднометалльной минерализации, определения качественных характеристик, необходимых при обогащении и извлечении полезных компонентов из руды Кимканского благороднометалльного проявления. В составе пробы преобладают филлитовидные мусковит-графит-кварцевые сланцы с переменным содержанием мусковита, графита и кварца, реже наблюдаются хлорит-серицит-кварцевые филлиты (общее название – черные сланцы). Структура – лепидогранобластовая. Текстура – сланцеватая, узелково-сланцеватая, пльчатая. На плоскостях сланцеватости наблюдается кливаж течения, скольжения, отрыва, сжатия. Филлитовидные сланцы имеют тонкозернистое строение: размер чешуй мусковита, серицита, биотита –  $0.01\text{--}0.05 \text{ мм}$ , кварца –  $0.05\text{--}0.1 \text{ мм}$ . Графит представлен тонкими чешуями и их пакетами, чаще землистыми агрегатами, нередко распределен во всех породообразующих минералах, особенно в слюдах. Сланцы интенсивно изменены послойной, реже секущей кварцевой и мусковит-кварцевой инъекцией, включающей рудную минерализацию. Метасоматиты образуют гнездовидные, прожилково-гнездовидные, прожилково-линзовидные обособления мощностью  $0.2\text{--}25 \text{ мм}$ . Размер зерен гранобластового кварца II –  $0.1\text{--}2 \text{ мм}$ , чешуй мусковита –  $0.1\text{--}1 \text{ мм}$ . Строение гидротермально-метасоматических образований и их взаимоотношения со сланцами наблюдались в прозрачных шлифах. Метасоматиты сложены гранобластовым кварцем прозрачным и серовато-прозрачным, либо мусковитом и кварцем, что харак-

Таблица 1. Элементы-примеси в углеродистых сланцах (г/т).

№ п/п	Класс крупности, мм	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Mo	Sb	Ba	W	Pt	Pb
1	-2.0+1.0	3060	331	48	13782	-	-	48	122	79	125	15	16	770	70	51	
2	-1.0+0.5	3093	211	51	12760	-	-	66	122	82	132	13	23	736	74	-	
3	-0.5+0.2	3057	262	56	13533	-	-	65	112	79	120	16	24	709	63	-	23
4	-0.2+0.01	2838	175	44	13870	-	78	88	109	72	121	15	17	696	67	-	27
5	-0.01+0.071	2735	238	62	16092	-	98	90	92	65	110	21	22	641	67	-	
6	-0.071+0.00	2619	297	55	16701	101	104	99	103	71	112	19	25	599	73	2	25

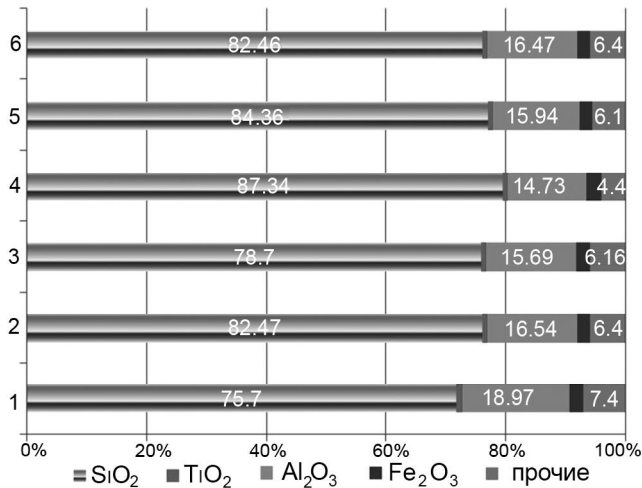


Рис. 3. Химический состав углеродистых сланцев.

1 – класс -2,0+1,0; 2 – класс -1,0+0,5; 3 – класс -0,5+0,2; 4 – класс -0,2+0,01; 5 – класс -0,01+0,071; 6 – класс -0,071+0,00.

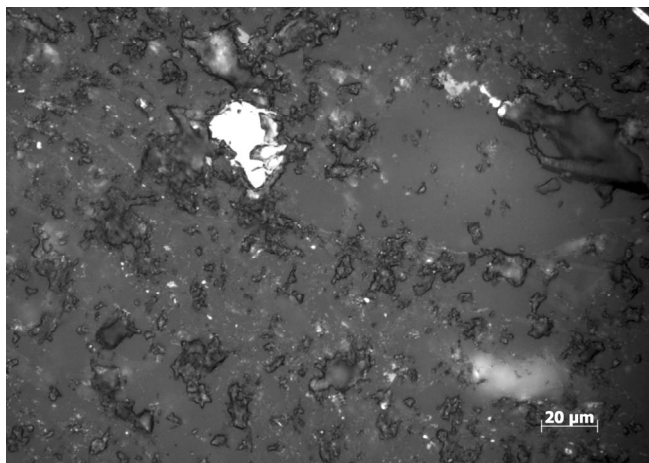
теризуется как высокотемпературные образования грейзенового типа. Количественным минералогическим анализом в составе технологической пробы определены полезные компоненты: золото – 7 знаков и серебро – 3 знака; рудные минералы – 3.4 %; гипергенные минералы – 4.3 %; рудные сростки – 1.4 %; рудно-метасоматические сростки – 10.4 %; сланцы с тонкой кварцево-рудной вкрапленностью – 3.4 %; сланцы и метасоматиты без видимой минерализации – 46.2 %. Рудные минералы Кимканской пробы: магнетит – 0.97 %, арсенопирит – 0.49 %, пирит 0.4 %, метапирит – 0.2 %, вольфрамит – 0.2 %, ильменит – 0.08 %, висмут – 0.03 %, выявлены в сростках с магнетитом, свинцом и кварцем (свинец – 0.02 %); в зернах и ед. зернах встречены: халькопирит, галенит и минералы марганца. Гипергенные минералы: лимонит – 3.3 %, гетит, гидрогетит – 0.12 %, ярозит – 0.08 %. Нерудные минералы: кварц – 21.7 %, графит – 5.2 %, мусковит (биотит, серицит) – 5 %, амфибол – 0.03 %. Аксессуарные минералы: циркон – 0.006 %, лейкоксен – 0.003 %, сфен, ксенотим, монацит, рутил, апатит, ортит. Размер зерен зо-

лота – 0.005–0.2 мм, цвет желтый, светло-желтый. Форма: пластинки удлинённые, изометричные, а также комковатая, иногда приближённая к кубу, октаэдру, шаровидная, чешуйчато-пластинчатая. В отраженном свете имеет золотисто-желтый цвет, сильный блеск, высокую отражательную способность. Рельеф низкий – I группа относительного рельефа.

Платина наблюдалась в полированном шлифе К-7: изометрическое зерно размером 0.1 мм с неровными краями (возможно это сросток кубических кристаллов) со средним рельефом, отражательной способностью 73–78 %. Кубическая сингония хорошо прорисована во внешнем контуре зерна. В кристалле метапирита выявлено зерно платины размером  $1 \cdot 10^{-9}$  мм.

Все перечисленные рудосодержащие компоненты, а также сланцы без видимой минерализации имеют рудный потенциал в зависимости от степени измельчения. Для Кимканской технологической пробы оптимальной будет многостадийная схема обогащения с измельчением первой стадии до +0.2 мм. При этом гравитационными методами возможно извлечь самое крупное в данной руде золото 0.15×0.2 мм, а в последующих стадиях, с понижением степени измельчения, степень извлечения золота будет возрастать до класса +0.071 мм.

Минераграфическое изучение полированных шлифов, изготовленных из наиболее измененных гидротермально-метасоматическими процессами мусковит-графит-кварцевых сланцев, позволило установить, что рудная минерализация представлена тонкой вкрапленностью, гнездовыми обособлениями и прожилками зернистого, реже друзовидного кварца величиной 0.1–2.5 мм, ориентированными согласно сланцеватости, реже под углом 30–90°. Кварц содержит неравномерно распределенные зернистые массы рудных минералов. В полированном шлифе К-10 наблюдалось зерно размером 30×15 мкм и точечные обособления – белого цвета. Под электронным микроскопом установлен следующий состав: Pt, Ir, Os, U, Th, Y, Yb, Dy, Gd, Ag, Cr, Ni, Co, Ti, Zr, Br, P, Fe, Mn, Pb, W, Si, O, Al, Mg, K, C, S. (рис. 4)



**Рис. 4.** Аншлиф К-10 – черный графитовый сланец с кварцевыми прожилками и линзами.

Электронно-микроскопический анализ сростков и минералов представлен в табл. 2.

Методом комбинационного рассеяния света (КР) в образцах К-10 и К-11 обнаружено присутствие магнетита ( $Fe_3O_4$ ), о чем свидетельствует широкая полоса в области  $667\text{ см}^{-1}$  (спектр в точке 1). Спектры образцов содержат две широкие линии в диапазоне

$1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ , которые характерны для разупорядоченного графита (в том числе “аморфного” или стеклоподобного углерода) (рис. 5, 6).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИТАЦИОННО-ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

В продуктах гравитационного обогащения (13 проб) платина установлена в 3 пробах, причем в 2-х совместно с золотом, иридий – в 5 пробах, осмий – в 3 совместно с иридием, иттрий – в 4-х пробах. Минеральный состав магнитной фракции продуктов гравитационного обогащения довольно однообразен: магнетит, магнетит + кварц, магнетит-гетит, реже сланцы с вкраплениями магнетита, но электронно-микроскопические спектры этих фракций несут обширную геохимическую информацию: Au, Ag, Pt, Jr, Os, Y, Yb, La, Ce, Nd, Po, Dy, Gd, Ru, Rb, Rh, Th, Zr, Hg, Sn, Zn, W, Cu, Mo, Bi, Te, Mn, Pb, Cr, Ni, Co, Ti, As, Sb, P и др. Следует отметить, что золото выявлено в 9 гравикоцентрах, в которых минералогическим анализом установлено от 1 до 12 знаков.

В подрешетный продукт извлекается 42.47 % золота и 5.25 % платины. В надрешетный – 57.52 % золота и 94.75 % платины.

**Таблица 2.** Электронно-микроскопический анализ сростков и минералов (конкретные спектры), немагнитная фракция -0.5+0.1 мм исходной пробы.

№ п/п	Условный номер пробы	Состав сростков и минералов (%)
1	1-1-1	Au <sub>80.69</sub> , Fe <sub>0.99</sub> , O <sub>1.73</sub> , C <sub>16.59</sub>
2	1-2-1	Au <sub>39.02</sub> , Fe <sub>8.39</sub> , S <sub>6.92</sub> , O <sub>7</sub> , C <sub>38.67</sub>
3	1-4-1	Bi <sub>5.28</sub> , Fe <sub>26.9</sub> , S <sub>25.3</sub> , O <sub>15.74</sub> , C <sub>26.78</sub>
4	1-5-1	Bi <sub>5.32</sub> , Cu <sub>8.67</sub> , Fe <sub>8.62</sub> , S <sub>9.27</sub> , Si <sub>1.26</sub> , Al <sub>0.59</sub> , O <sub>23.23</sub> , C <sub>43.04</sub>
5	1-5-2	Sn <sub>2.36</sub> , Zn <sub>2.76</sub> , Cu <sub>60.24</sub> , Fe <sub>4.03</sub> , S <sub>2.78</sub> , Si <sub>0.7</sub> , O <sub>4.42</sub> , C <sub>23.34</sub>
6	1-6-1	Au <sub>36.16</sub> , Rb <sub>0.77</sub> , Cu <sub>0.9</sub> , Fe <sub>12.59</sub> , S <sub>13.57</sub> , O <sub>9.43</sub> , C <sub>26.58</sub>
7	2-1-1	Au <sub>13.51</sub> , Fe <sub>10.99</sub> , K <sub>1.59</sub> , Si <sub>4.68</sub> , Al <sub>4.25</sub> , O <sub>44.37</sub> , C <sub>20.61</sub>
8	2-2-1	Y <sub>25.15</sub> , Dy <sub>3.5</sub> , Br <sub>1.6</sub> , Fe <sub>3.08</sub> , P <sub>11.43</sub> , Si <sub>1.18</sub> , O <sub>31.22</sub> , C <sub>22.84</sub>
9	2-3-1	Au <sub>38.41</sub> , Fe <sub>12.76</sub> , Si <sub>3.27</sub> , O <sub>11.18</sub> , C <sub>34.38</sub>
10	2-4-1	Au <sub>72.44</sub> , Hg <sub>5.21</sub> , Fe <sub>6.39</sub> , K <sub>0.62</sub> , Si <sub>1.68</sub> , Al <sub>0.91</sub> , O <sub>12.75</sub>
11	2-5-1	Au <sub>54.9</sub> , Fe <sub>2.2</sub> , K <sub>3.87</sub> , Cl <sub>3.11</sub> , Al <sub>0.52</sub> , Na <sub>1.84</sub> , O <sub>9.73</sub> , C <sub>23.83</sub>
12	2-6-1	Au <sub>39.38</sub> , Sr <sub>0.5</sub> , Fe <sub>4.21</sub> , Ca <sub>1.41</sub> , Al <sub>8</sub> , Na <sub>0.98</sub> , O <sub>21.44</sub> , C <sub>24.08</sub>
13	2-6-4	Au <sub>25.52</sub> , Sr <sub>3.56</sub> , Cu <sub>0.42</sub> , Fe <sub>4.62</sub> , K <sub>2.9</sub> , Cl <sub>2.74</sub> , Al <sub>4.33</sub> , Na <sub>0.59</sub> , O <sub>7.42</sub> , C <sub>47.9</sub>
14	2-7-1	Au <sub>61.14</sub> , Hg <sub>3.82</sub> , K <sub>1.2</sub> , Cl <sub>0.97</sub> , S <sub>2.69</sub> , Al <sub>1.14</sub> , Na <sub>0.59</sub> , O <sub>12.28</sub> , C <sub>16.17</sub>
15	3-1-1	Zn <sub>64.05</sub> , Fe <sub>19.76</sub> , O <sub>5.56</sub> , C <sub>10.63</sub>
16	3-2-2	Zn <sub>68.76</sub> , Si <sub>0.8</sub> , O <sub>16.71</sub> , C <sub>13.73</sub>
17	4-1-1	Bi <sub>22.48</sub> , Tc <sub>7.72</sub> , Fe <sub>19.75</sub> , K <sub>0.58</sub> , Si <sub>2.96</sub> , Al <sub>2.59</sub> , O <sub>35.73</sub> , C <sub>8.19</sub>
18	4-2-1	Pb <sub>13.93</sub> , Tc <sub>7.75</sub> , Fe <sub>18.82</sub> , K <sub>1.72</sub> , Si <sub>4.19</sub> , Al <sub>3.74</sub> , O <sub>37.54</sub> , C <sub>12.31</sub>
19	4-2-5	Tc <sub>5.87</sub> , Bi <sub>10.03</sub> , Pb <sub>4.81</sub> , Fe <sub>13.37</sub> , K <sub>1.96</sub> , Si <sub>5.61</sub> , Al <sub>4.39</sub> , O <sub>39.72</sub> , C <sub>14.24</sub>

(самородный цинк)

(самородный цинк)

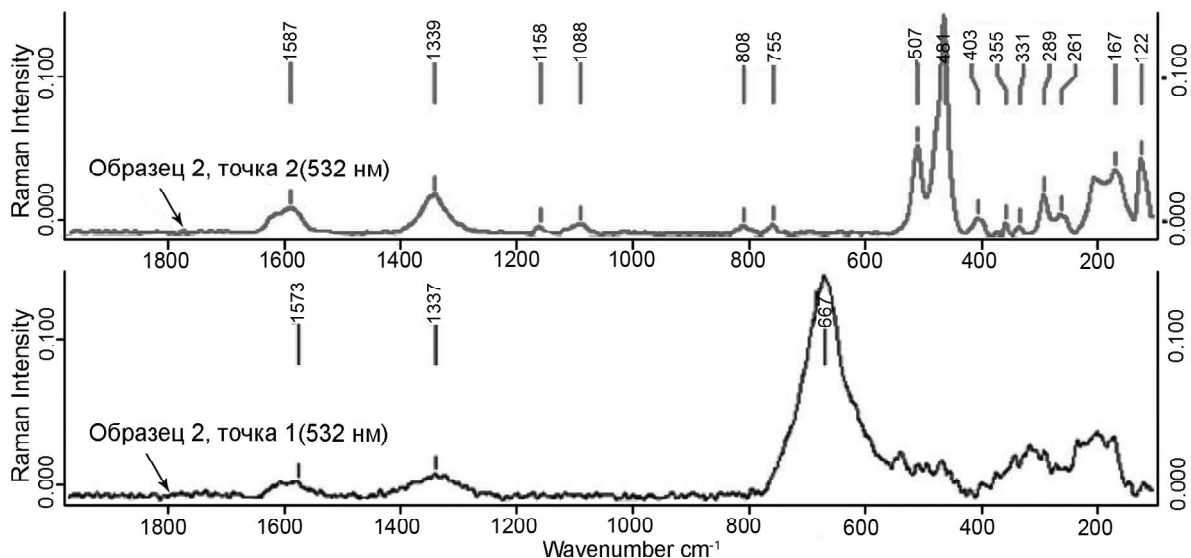


Рис. 5. КР спектры образца К-11(аншлиф крупнозернистого кварца секущего прожилка).

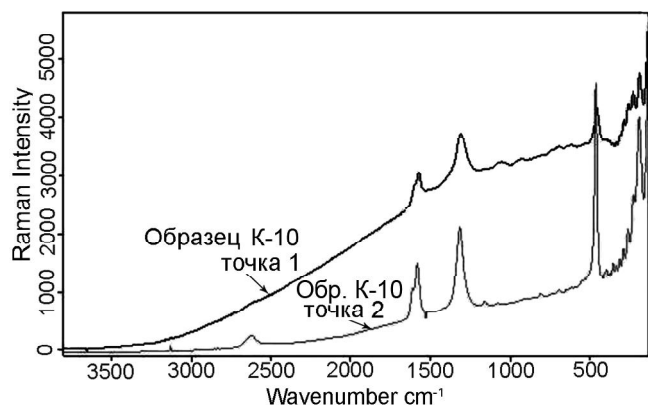


Рис. 6. КР спектры образца К-10 (черный графитовый сланец с интенсивной послойной кварцевой инъекцией в виде прожилков и линз до 2 мм).

Таким образом, балансовыми расчетами установлено исходное содержание благородных металлов в графитизированных Кимканских сланцах: Au – 0.55 г/т; Pt – 0.49 г/т. Прямое определение из навесок исходной руды: Au – 0.08 г/т (ААС); Pt – 0.006 г/т (химико-спектральный V категории точности “Дальгеофизика”). Определение золота нейронно-активационным методом анализа показывает достаточно близкие к расчетным значения (табл. 3).

Гравитационными методами извлекается 79.4 % золота (20.6 % доизвлекается флотацией) и 11.9 % платины (88.1 % доизвлекается только флотацией, связанной преимущественно с графитом или находящейся в ультрадисперсном состоянии). Результаты электронно-микроскопического и микронзондового исследования продуктов обогащения подтверждают

наличие благородных металлов в продуктах обогащения. Пробность золота, извлеченного гравитационными методами, понижается с 960 – на первой стадии обогащения, до 640 – на четвертой.

Информативными в отношении рудной минерализации являются флотационные концентраты, но в них золото фиксируется редко. Конкретные спектры микровключений в основном графитовом концентрате: Ag<sub>72.62</sub>, S<sub>10.42</sub>, Si<sub>1.23</sub>, Al<sub>0.69</sub>, O<sub>13.08</sub>, C<sub>1.95</sub>; Ir<sub>34.22</sub>, Os<sub>19.46</sub>, Yb<sub>3.3</sub>, Dy<sub>3.35</sub>, Gd<sub>1.57</sub>, Co<sub>0.74</sub>, Si<sub>1.69</sub>, O<sub>31.37</sub>, C<sub>4.35</sub>; Pt<sub>2.8</sub>, Dy<sub>1.65</sub>, Y<sub>18.7</sub>, Co<sub>1.16</sub>, P<sub>10.93</sub>, Si<sub>6.86</sub>, Al<sub>1.65</sub>, O<sub>29.92</sub>, C<sub>21.28</sub>. Основной флотационный графитовый концентрат исходной пробы содержит платину (2.8 %) и иттрий (18.7 %).

#### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЙ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ИСХОДНЫХ СЛАНЦАХ И ПРОДУКТАХ ОБОГАЩЕНИЯ

Серии продуктов флотационного и гравитационного обогащения анализировались на содержание МЭ с последующей проверкой выборок на нормальность (*Shapiro–Wilk’s test*) и расчетом критерия *Newman–Keuls (КНК)* для сравнения средних значений содержания микроэлементов в сформированных выборках. Исходные содержания микроэлементов анализировались по результатам ситового анализа проб. Технологические ассоциации МЭ выявлялись в трех сериях: графитовые флотационные концентраты (30 выборок); сульфидные флотационные концентраты (17 выборок) и гравитационные концентраты (24 выборки). В качестве нулевой принята гипотеза об отсутствии взаимосвязи или корреляции между исследуемыми переменными (содержаниями микроэлементов), об отсутствии различий в распределении

Таблица 3. Результаты нейтронно-активационного определения золота.

Проба	$t_{\text{набр, С}}$	$I_{\text{пик, имп/с}}$	$\sigma_{\text{изм, \%}}$	$M_{\text{пр, г}}$	$C_{\text{Au, г/т}}$
Кимканские графитизированные сланцы, исходная проба (-0.2+0 мм)	1200	0.11	30	50	0.4
Кимканские графитизированные сланцы, исходная проба (-0.074+0 мм)	600	0.12	30	95	0.3

Таблица 4. Критерии Ньюмена-Келса для вариационного ряда флотационных концентратов (режим графитовой флотации) Кимканской пробы (фрагмент).

№		x12	x11	x10	x17	x16	x15	x8	x7	x6	x9
		<b>Sn</b>	<b>Ag</b>	<b>Mo</b>	<b>Pb</b>	<b>Pt</b>	<b>W</b>	<b>Sr</b>	<b>Rb</b>	<b>As</b>	<b>Zr</b>
x1	<b>Ti</b>	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		49.685 (4.387)	49.576 (4.286)	49.216 (4.170)	48.652 (3.314)	48.499 (4.560)	48.256 (4.468)	47.446 (4.363)	47.367 (4.241)	46.526 (4.096)	44.893 (3.917)
x14	<b>Ba</b>	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		14.729 (4.286)	14.620 (4.170)	14.260 (4.030)	13.696 (2.772)	13.543 (4.468)	13.299 (4.363)	12.490 (4.241)	12.411 (4.096)	11.570 (3.917)	9.937 (3.685)
x4	<b>Cu</b>	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		11.066 (4.170)	10.957 (4.030)	10.598 (3.858)	10.033 (4.560)	9.880 (4.363)	9.637 (4.241)	8.827 (4.096)	8.749 (3.917)	7.907 (3.685)	6.274 (3.356)
x5	<b>Zn</b>	(*)	(*)	(*)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		5.392 (4.030)	5.283 (3.858)	4.924 (3.633)	<b>4.359</b> <b>(4.468)</b>	<b>4.206</b> <b>(4.241)</b>	<b>3.963</b> <b>(4.096)</b>	<b>3.153</b> <b>(3.917)</b>	<b>3.075</b> <b>(3.685)</b>	<b>2.233</b> <b>(3.356)</b>	<b>0.600</b> <b>(2.800)</b>
x9	<b>Zr</b>	(*)	(*)	(*)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		4.792 (3.858)	4.683 (3.633)	4.323 (3.314)	<b>3.759</b> <b>(4.363)</b>	<b>3.606</b> <b>(4.096)</b>	<b>3.363</b> <b>(3.917)</b>	<b>2.553</b> <b>(3.685)</b>	<b>2.475</b> <b>(3.356)</b>	<b>1.633</b> <b>(2.800)</b>	
x6	<b>As</b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		<b>3.159</b> <b>(3.633)</b>	<b>3.050</b> <b>(3.314)</b>	<b>2.690</b> <b>(2.772)</b>	<b>2.126</b> <b>(4.241)</b>	<b>1.973</b> <b>(3.917)</b>	<b>1.730</b> <b>(3.685)</b>	<b>0.920</b> <b>(3.356)</b>	<b>0.842</b> <b>(2.800)</b>		
x7	<b>Rb</b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		<b>2.317</b> <b>(3.314)</b>	<b>2.209</b> <b>(2.772)</b>	<b>1.849</b> <b>(4.560)</b>	<b>1.284</b> <b>(4.096)</b>	<b>1.131</b> <b>(3.685)</b>	<b>0.888</b> <b>(3.356)</b>	<b>0.079</b> <b>(2.800)</b>			
x8	<b>Sr</b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		<b>2.239</b> <b>(2.772)</b>	<b>2.130</b> <b>(4.560)</b>	<b>1.770</b> <b>(4.468)</b>	<b>1.206</b> <b>(3.917)</b>	<b>1.053</b> <b>(3.356)</b>	<b>0.810</b> <b>(2.800)</b>				
x16	<b>Pt</b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
		<b>1.186</b> <b>(4.468)</b>	<b>1.077</b> <b>(4.363)</b>	<b>0.718</b> <b>(4.241)</b>	<b>0.153</b> <b>(3.356)</b>						

Примечание. Расчетное значение: (\*) – наличие достоверных отличий, (-) – отсутствие достоверных отличий. Ячейки, стоящие на пересечении строк и столбцов, указывают, какие выборки сравниваются между собой. В скобках приводятся критические (табличные) значения для выбранного доверительного уровня ( $p = 0.95$ ).

ях (параметрах распределений) в выборках. Если полученное значение *КНК* меньше табличного или равно ему, то признается наличие существенного различия между уровнем признака в рассматриваемых выборках (принимается альтернативная гипотеза – наличие корреляционных связей). Если же полученное значение *КНК* больше табличного, принимается нулевая гипотеза. Достоверность различий тем выше, чем меньше значение *КНК*.

Фрагмент расчета для серии флотационных графитовых концентратов кимканской пробы приведен в табл. 4.

Анализ статистических критериев показал, что элементы: Zn, Zr, As, Sn, Rb, Ag, Sr, Mo, Pb, расположенные в порядке убывания корреляционной связи с Pt, можно считать типоморфными, как в самородном состоянии, так и в виде интерметаллических соединений, для флотационных графитовых концентратов кимканской пробы (корреляции выборок по *КНК*).

Для флотационных сульфидных концентратов корреляционные связи с Au выявлены для элементов Ag, Sr, Mo, Re, U, As, Zn, в гравитационных концентратах – Ag, Hg, W, Sn, Pb, (Rb, Mo, Bi, Ti). Получен-

Таблица 5. Типоморфные МЭ в исходных сланцах и продуктах обогащения.

Тип объекта	Типоморфные МЭ по КНК
Исходные высокоуглеродистые сланцы	Re, Se, (Ag, Mo), Hg, (Cs, As, Au, U), (Zn, W), Au, Cr, Ni, Ti, Mn, W, Sb, As, Sn, P, La, Ce, Nd, Zn
Флотационные графитовые концентраты	Pt, Zn, Zr, As, Sn, Rb, Ag, Sr, Mo, Pb, U (Pt-Pd-Ir-Os)
Флотационные сульфидные концентраты	Au, Ag, Sr, Mo, Re, U, As, Zn, (Se, Cs)
Гравитационные концентраты	Au, Ag, Hg, W, Sn, Pb, (Rb, Mo, Bi, Ti), Zn

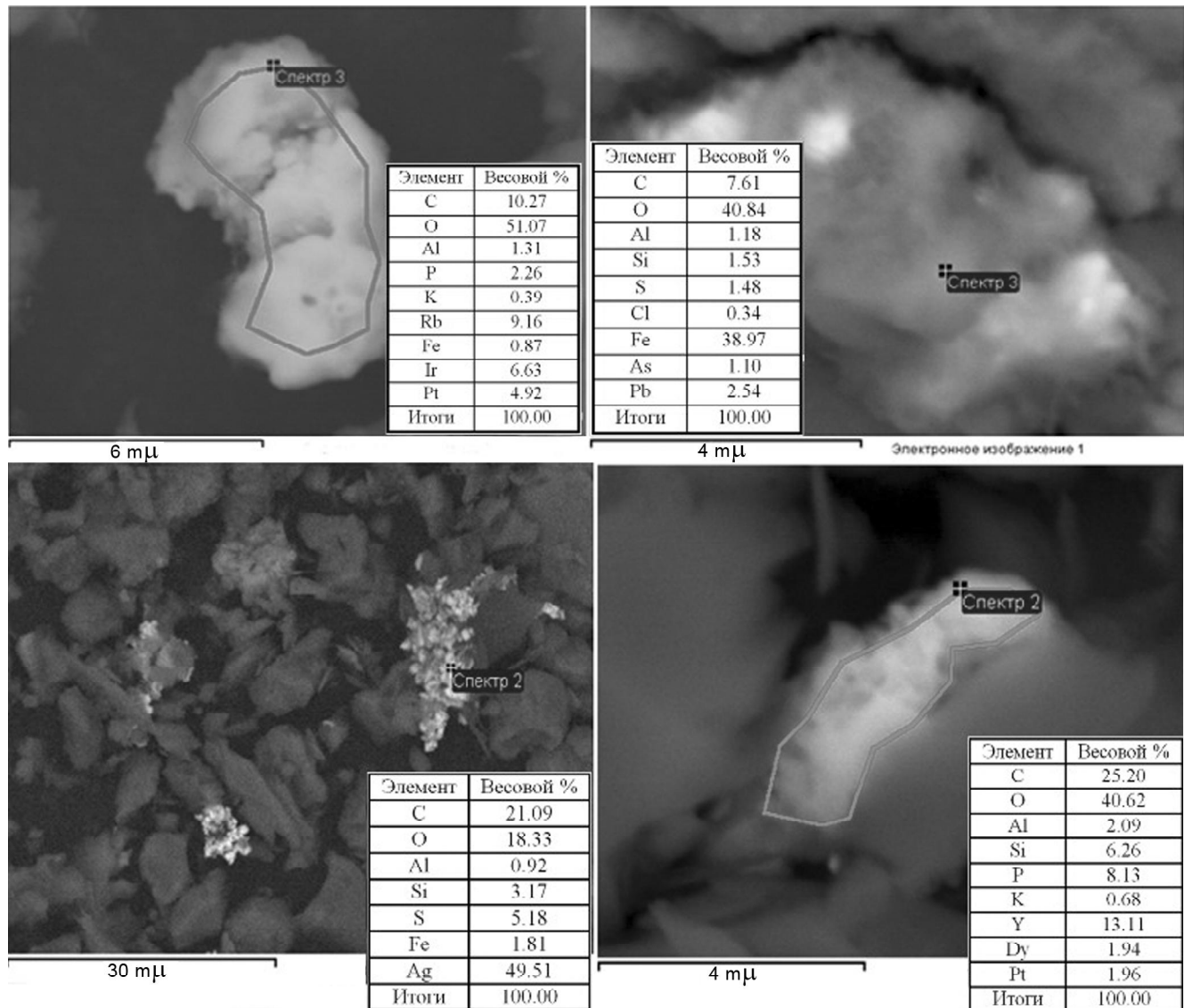


Рис. 7. Микровключения с Pt, Ir, Pb и Ag во флотационном графитовом концентрате.

ные выводы согласуются с данными минералогического изучения концентратов обогащения. Некоторые фотографии микровключений с благородными и тяжелыми металлами из продуктов обогащения приведены на рис. 7–9.

Данные по выявленным типоморфным природным и технологическим ассоциациям в сланцах и продуктах их обогащения МЭ приведены в табл. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе минералого-технологических исследований укрупненных лабораторных проб углеродистых сланцев Кимканского рудопоявления с применением методов математической статистики выявлены наиболее распространенные природные и технологические ассоциации МЭ, получение товарных соединений которых может иметь промышленное значение:



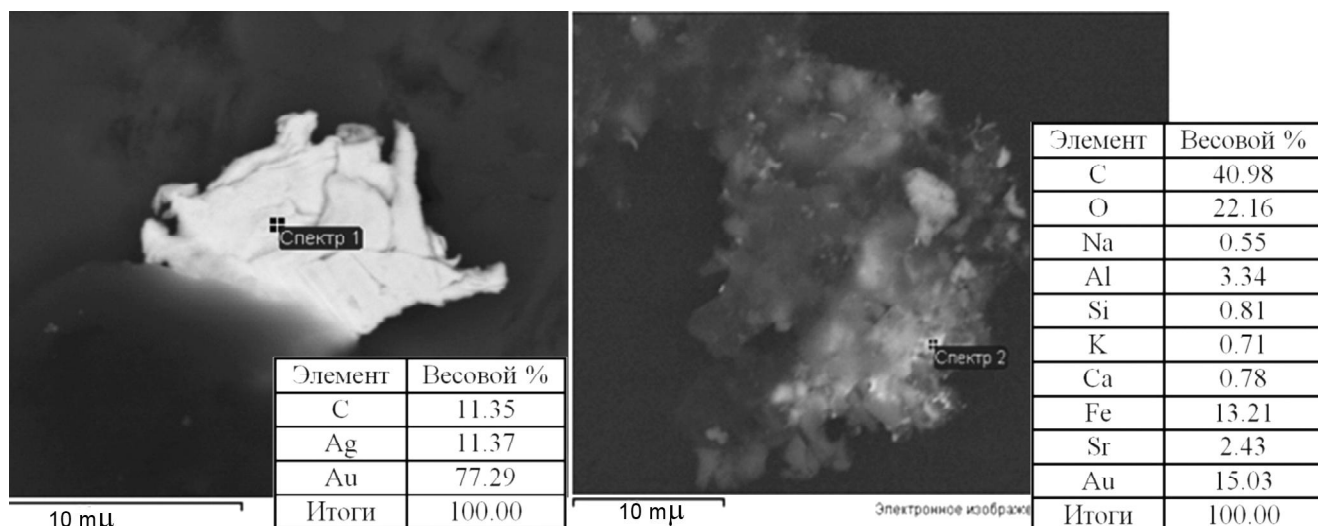


Рис. 8. Микровключения с Au и Ag во флотационном сульфидном концентрате.

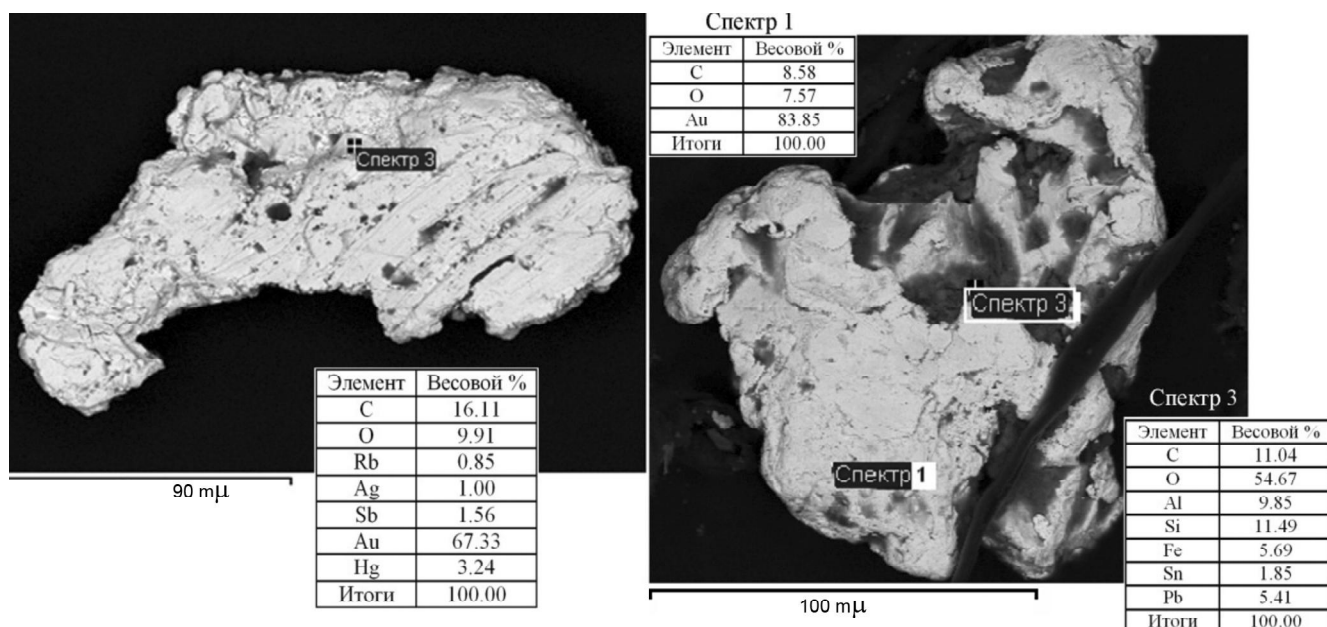


Рис. 9. Золото, выделенное из гравитационного концентрата.

а) ассоциации халькофильных элементов, обусловленные накоплением их на восстановительных или сероводородных барьерах, включающие U–Se–Mo–Pb–Zn–Re–Ag, причем, Mo, U, Se имеют наибольшие содержания (по отношению к фоновым);

б) ассоциации, обусловленные гидротермальным эпигенетическим привносом элементов в сланценосную формацию, например, Hg–Pb–Zn, которые извлекаются в гравитационный концентрат;

в) технологические ассоциации благородных металлов Au–Ag, платиноиды и платиноидные металлы (Pt–Pd–Ir–Os);

г) некоторые ассоциации, например, Ni–Cr–Co, возникшие, по-видимому, вследствие широкого развития массивов основных и ультраосновных пород в областях питания, наблюдаются как в гравитационных, так и во флотационных концентратах. Из ассоциаций с повышенным содержанием Mo–Re–Ag–Hg–Pb–Zn–Sn в сланценосных толщах наибольшая степень обогащения (по отношению к их фоновым концентрациям) выявлена для Mo.

Рудовмещающие породы представлены мусковит-графит-кварцевыми филлитовидными сланцами, с переменным содержанием породообразующих ми-

нералов, реже хлорит-серицит-кварцевыми филлитами. Структура лепидогранобластовая; текстура сланцеватая, узелково-сланцеватая, плейчатая. Черные сланцы интенсивно изменены послойной, реже секущей кварцевой и мусковит-кварцевой руднометасоматической инъекцией.

Рудная минерализация представлена: золотом, платиной, иридием, осмием, иттрием. В руде Кимканского проявления установлен необычайно широкий спектр химических элементов.

По вещественному составу руды, структурным особенностям Кимканского черносланцевого блока данное рудопоявление сопоставимо с крупными большеобъемными золоторудными месторождениями, относящимися к черносланцевой формации: 1) рассеянное, тонковкрапленное состояние благороднометаллической минерализации; 2) наличие в составе рудовмещающих пород углеродистого вещества; 3) присутствие в составе руды самородных металлов (свинец, цинк, висмут, а также золото и платиноиды).

Приведенные результаты исследований показывают наличие в углеродистых породах Буреинского массива промышленного золотого оруденения с сопутной платиноидной минерализацией.

Исследования на обогатимость показали принципиальную возможность получения товарных концентратов благородных металлов гравитационно-флотационными методами с последующей их переработкой пиро- или гидрометаллургическими методами.

Полученные результаты являются основой для создания новых методов и технологий обогащения высокоуглеродистого сырья при комплексном освоении твердых полезных ископаемых в горнопромышленных районах Дальнего Востока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арифлулов Ч.Х. Золотоносность черносланцевых толщ и обстановки формирования рудных тел // Руды и металлы. 2010. № 1. С. 10–21.
2. Берри Л., Мейсон В., Дитрих Р. Минералогия. М.: Мир, 1987. 592 с.
3. Буряк В.А., Михайлов Б.К., Цымбалюк Н.В. Генезис, закономерное размещение и перспективы золота – и платиноносности черносланцевых толщ // Руды и металлы. 2002. № 6. С. 25–36.
4. Каждан А.Б., Гуськов О.И., Шиманский А.А. Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых. М.: Недра, 1979. 168 с.
5. Клер В.Р., Ненахова Ф.Я., Шпирт М.Я. и др. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения. М.: Наука, 1988. 256 с.
6. Ханчук А.И., Диденко А.Н., Рассказов И.Ю. и др. Графитовые сланцы как перспективный источник благородных металлов на Дальнем Востоке России // Вестн. ДВО. 2010. № 3. С. 3–12.
7. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Никитенко Е.М. и др. Распределение благородных металлов в черных сланцах золоторудного месторождения Дегдекан (Северо-Восток России) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 3–11
8. Шпирт М.Я., Рашевский В.В. Микроэлементы горючих ископаемых. Т. 5, кн. 4. М.: Кучково поле, 2010. 384 с.
9. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: Наука, 1994. 304 с.
10. Kortenski J., Sotirov A. Trace and major element content and distribution in Neogene lignite from of the Sofia Basin. Bulgaria // Int. J. Coal Geol. 2002. V. 52, N. 4. P. 63–82.
11. Mossman D., Gauthier-Lafaye R, Jackson S. Black shales, organic matter, ore genesis and hydrocarbon generation in the Paleoproterozoic. Francevillian Series. Gabon // Precambrian Research. 2005. V. 137. P. 253–272.
12. Tribouvillard N., Riboulleau A., Lyons T. et al. Enhanced trapping of molybdenum by sulfurized marine organic matter of marine origin in Mesozoic limestones and shales// Chemical Geology. 2004. V. 213. P. 385–401.

Рекомендована к печати Г.Л. Кирилловой

*A.I. Khanchuk, I.Yu. Rasskazov, T.N. Alexandrova, V.S. Komarova*

#### **Natural and technological typomorphic associations of minor elements in carbonaceous rocks of the Kimkansky ore manifestation of precious metals, Far East**

The paper presents the results of mineralogical-technological examination of carbonaceous rocks of the Kimkansky ore manifestation of precious metals. On the basis of these results new typomorphic natural and technological minor element associations were revealed using mathematical statistical criteria.

**Keywords:** carbonaceous rocks, enrichment, minor elements, flotation, statistical criteria.