



## ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ООЛИТАХ БАКЧАРСКОГО УЗЛА (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

М. А. Рудмин

В пределах Бакcharского рудного узла осуществляется геолого-технологическая оценка руд Fe методом скважинной гидродобычи. Данная работа посвящена изучению элементов-примесей в железорудных оолитах. Для реализации поставленной задачи были использованы следующие виды аналитических исследований: рентгенофлуоресцентная микроскопия, электронная микроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. В результате получены содержания примесных элементов в рудных оолитах. Описаны формы нахождения P. Основное содержание P связано с редкоземельными фосфатами. Выявлено, что в составе рудных оолитов постоянно присутствуют примеси V (0,35 %) и Mn (0,3 %). Установлено что в рудных оолитах нет промышленно значимых содержаний благородных и редких элементов.

**Ключевые слова:** Бакcharский рудный узел, оолитовые руды, редкоземельные фосфаты, рентгенофлуоресцентная микроскопия, электронная микроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

## ADMIXTURE ELEMENTS IN IRON ORE OOLITES OF THE BAKCHAR CLUSTER (TOMSK REGION)

M. A. Rudmin

Geological and technological assessment of iron ore by hydraulic borehole mining is being conducted within the Bakchar iron ore cluster. The paper is focused on the admixture elements in ore oolites. To achieve the objectives, the following analytical study methods were used: X-ray fluorescence microscopy, electron microscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry. Based on the investigation results the contents of dopant impurities and detrimental impurities in ore oolites were determined. Forms of phosphorous occurrence are described. The main P content is associated with rare-earth phosphates. It is discovered that there are constant vanadium and manganese impurities with their contents up to 0.35% and 0.3%, respectively. The ore oolites have no high commercially significant contents of precious and rare metals.

**Keywords:** the Bakchar iron ore cluster, oolitic ore, rare-earth phosphate, X-ray fluorescence microscopy, electron microscopy, XD analysis, inductively coupled plasma mass spectrometry.

Бакcharский рудный узел расположен в юго-восточной части Западно-Сибирского железорудного бассейна (рис. 1) в 200 км на северо-запад от Томска. Железоносные отложения являются типичными осадками прибрежно-морских фаций – гравелитами, оолитовыми рудами, песчаниками, алевролитами и глинами. Руды локализуются в трех горизонтах (вверх по разрезу): на-рымском, колпашевском и бакcharском [1, 2]. На месторождении были выделены следующие типы руд по минеральному составу и структурным особенностям [1, 2]: гидрогетитовая оолитовая рыхлая руда; гетит-гидрогетитовая оолитовая руда с сидеритовым цементом; лептохлорит-гидрогетитовая оолитовая руда с хлорито-глинистым цементом; гетит-гидрогетитовая оолитовая руда с гидрослюдистым цементом; глауконит-гидрогетитовая оолитовая руда с сидерит-хлоритовым цементом. Руды характеризуется гидрогетитовыми и хлорит-гидрогетитовыми оолитами. Основное различие перечисленных типов заключается в характере и составе цемента, что определяется фациальной обстановкой. Залежи «рыхлых» руд (гидрогетитовые оолитовые рыхлые руды) вскры-

ваются на западном (около с. Бакchar) и восточном (около с. Полынянка) участках площади узла. На западном участке «рыхлые» руды локализуются на глубине 160–180 м, на восточном – 200–210 и 220–225 м.

С открытия месторождения и до сих пор изучением железных руд Западно-Сибирского бассейна занимались многие ученые, такие как А. А. Бабин, И. В. Николаева, Н. Х. Белоус, А. Н. Кондаков, Ю. П. Казанский, А. К. Мазуров, В. А. Домаренко, А. Я. Пшеничкин, Л. П. Рихванов, Е. М. Асочакова и др. [1–7]. Однако, несмотря на огромный вклад всех исследователей, проблема обогащения бакcharских руд до сих пор не решена.

Компоненты руд по влиянию на показатели металлургического процесса можно разделить на три группы: основной компонент (Fe), полезные и вредные примеси. По имеющимся данным [1–6], основной вредной примесью в исследуемых рудах является P, так как на стадии обогащения его невозможно выделить в самостоятельный концентрат. К остальным вредным примесям железных руд относятся As, Cu, Zn, Pb, Sn. Полезная примесь – V, так как при введении его в сталь повышаются прочность, вязкость и износостойкость металла. К полезным примесям могут быть



**Рис. 1.** Схема Западно-Сибирского железорудного бассейна [2, 5]

1 – площадь распространения мел-палеогенового моря; 2 – полоса распространения прибрежно-морских железорудных отложений; 3 – площади наиболее крупных железорудных узлов (месторождений)

отнесены и другие компоненты, если будет возможно их выделение в кондиционный продукт на стадии обогащения.

По данным исследователей [4, 7], в бакчарских рудах содержится 0,65–1,8 г/т Au, 10–127 мг/т Pt и 1,3–1,5 мг/т Pd. В связи с тем что в настоящее

время осуществляется геолого-технологическая оценка руд Fe методом скважинной гидродобычи, изучение элементов-примесей в рудных оолитах актуально как никогда. Решение поставленной задачи позволит сделать выводы о возможности комплексного освоения бакчарской железной руды. При этом особое внимание уделяется «рыхлым» рудам, так как они являются первоочередными для освоения методом скважинной гидродобычи.

#### Фактический материал и методы исследований

Для решения задачи в данной работе используются следующие методы аналитических исследований: рентгенофлуоресцентный микроанализ (HORIBA XGT-7200), электронная (Hitachi S-3400N) микроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и атомно-абсорбционный анализ на золото. Все анализы выполнялись для проб, отобранных из керна скважин нижней части бакчарского горизонта (залёжи «рыхлой» руды) из западного и восточного участков рудного узла. Пробы делились на гранулометрические классы (более 1 мм; –1...+0,5 мм; –0,5...+0,2 мм; –0,2...+0,1 мм; менее 0,1 мм) методом «мокрого» ситования. Для установления среднего элементного состава хлорит-гидрогетитовых и гидрогетитовых оолитов на рентгенофлуоресцентном микроанализаторе выполнялось по три измерения в 10 выборочных оолитах каждого типа в каждом образце (всего проанализировано 540 спектров), при этом содержание кислорода не измерялось, но учитывалось автоматически по результатам пересчета элементов в оксидную форму. Все анализы выполнялись на базе лабораторий Института природных ресурсов ТПУ.

#### Анализ и обсуждение результатов

В результате анализа 23 образцов из 14 скважин установлено, что гранулометрический состав

Содержание основных элементов (%) в «рыхлом» типе руд по гранулометрическим классам для западного и восточного участков рудного узла (данные ИСП-МС)

| Участок     | Западный |           |             |             |      | Восточный |           |             |             |      |
|-------------|----------|-----------|-------------|-------------|------|-----------|-----------|-------------|-------------|------|
| Фракция, мм | +1       | –1...+0,5 | –0,5...+0,2 | –0,2...+0,1 | –0,1 | +1        | –1...+0,5 | –0,5...+0,2 | –0,2...+0,1 | –0,1 |
| Выход, %    | 6,8      | 13,1      | 65,6        | 8,1         | 6,3  | 6,2       | 13,8      | 59,4        | 13,1        | 7,6  |
| Al          | 0,95     | 1,22      | 1,34        | 1,31        | 1,19 | 1,15      | 1,22      | 1,37        | 1,60        | 2,42 |
| P           | 0,17     | 0,15      | 0,56        | 0,04        | 0,19 | 0,18      | 0,18      | 0,44        | 0,08        | 0,09 |
| K           | 0,20     | 0,24      | 0,23        | 0,62        | 0,40 | 0,27      | 0,27      | 0,36        | 0,87        | 0,73 |
| Ca          | 0,06     | 0,06      | 0,05        | 0,08        | 0,09 | 0,13      | 0,07      | 0,08        | 0,13        | 0,20 |
| Ti          | 0,45     | 0,49      | 0,53        | 0,64        | 0,58 | 0,44      | 0,39      | 0,43        | 0,67        | 0,80 |
| V           | 0,11     | 0,15      | 0,18        | 0,10        | 0,11 | 0,13      | 0,19      | 0,19        | 0,19        | 0,17 |
| Cr          | 0,02     | 0,03      | 0,04        | 0,03        | 0,04 | 0,03      | 0,04      | 0,04        | 0,05        | 0,05 |
| Mn          | 0,19     | 0,15      | 0,12        | 0,09        | 0,10 | 0,24      | 0,19      | 0,15        | 0,13        | 0,14 |
| Fe          | 30,6     | 34,2      | 38,2        | 21,4        | 26,4 | 33,5      | 41,4      | 39,7        | 35,9        | 35,4 |
| Zn          | 0,02     | 0,02      | 0,02        | 0,02        | 0,02 | 0,02      | 0,02      | 0,02        | 0,02        | 0,03 |
| As          | 0,05     | 0,04      | 0,05        | 0,03        | 0,04 | 0,04      | 0,05      | 0,055       | 0,04        | 0,04 |

**Примечание.** Анализы выполнены в лаборатории Томского политехнического университета методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Аналитик И. С. Мазурова.



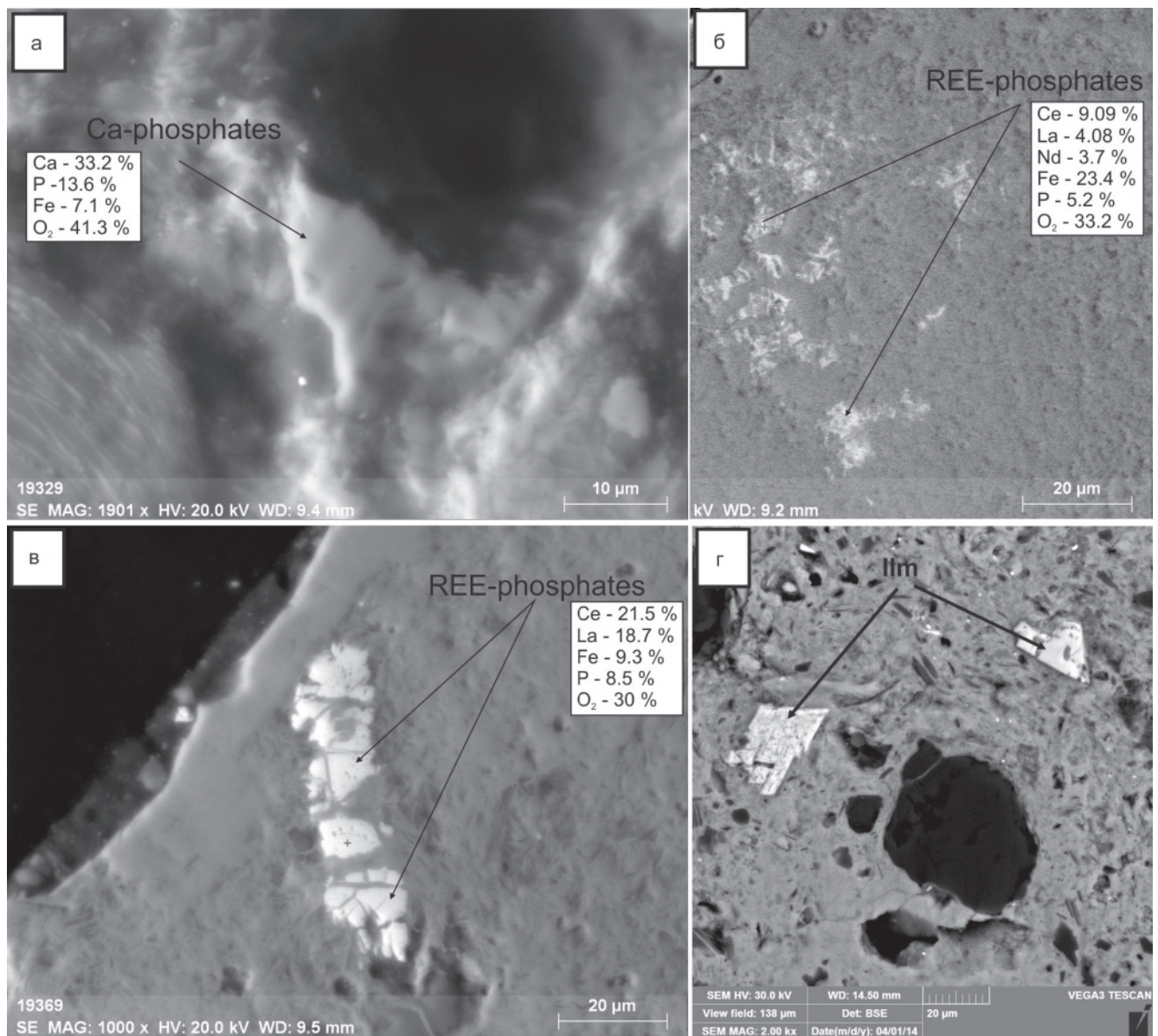
«рыхлого» типа руд на площади рудного узла постоянный. Выход фракции более 1 мм составляет 6,3 %;  $-1...+0,5$  мм – 13,6 %;  $-0,5...+0,2$  мм – 60,7 %;  $-0,2...+0,1$  мм – 12 %; менее 0,1 мм – 7,3 %. Наибольший выход имеет фракция  $-0,5...+0,2$  мм, где и концентрируется основной объем рудных оолитов.

Элементный состав руд для разных гранулометрических классов и участков рудного узла приведен в таблице. «Рыхлые» руды характеризуются средними содержаниями Fe 35 и 38 %, P 0,41 и 0,32 %, V 0,16 и 0,18 % для западного и восточного участков соответственно. При этом содержание Fe увеличивается на 5–8 % для фракции с максимальным выходом ( $-0,5...+0,2$  мм). Гранулометрический класс  $-1...+0,2$  мм на западном участке имеет общий выход около 80 %, при этом среднее

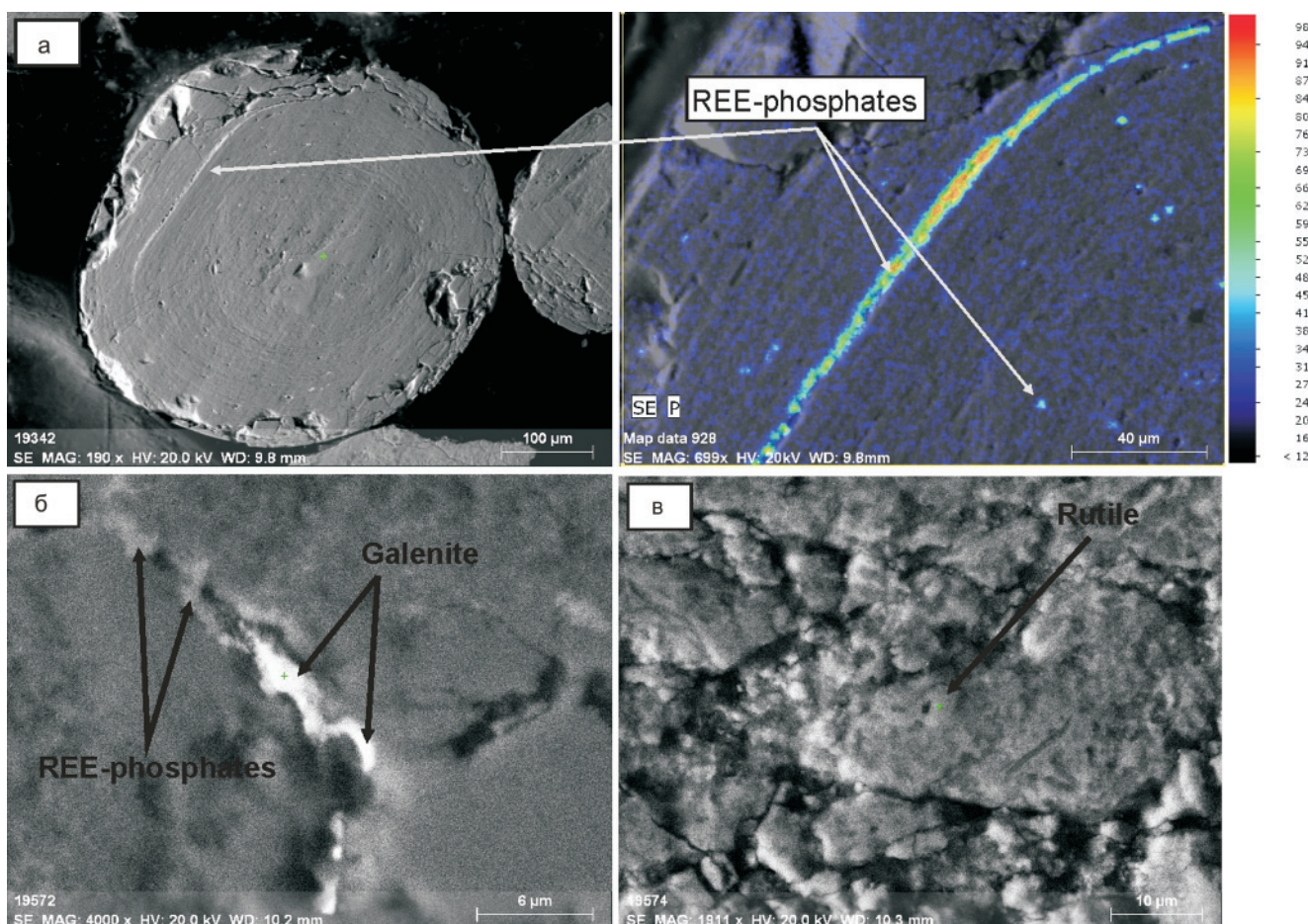
содержание Fe, P и V в нем 37,5, 0,49 и 0,17 % соответственно, что существенно упрощает дальнейшую схему обогащения этих руд. Выход гранулометрического класса  $-1...+0,1$  мм на восточном участке около 86,2 %, при этом среднее содержание Fe, P и V в нем 39,4, 0,35 и 0,19 % соответственно, что позволяет считать эти руды наиболее богатыми.

Среднее содержание Au в «рыхлых» рудах по данным анализа 30 проб составляет 1,66 мг/т и варьирует от 0,03 до 18,7 мг/т. Судя по полученным данным, железорудные оолиты Бакчарского узла неперспективны для попутного извлечения Au.

Руды состоят преимущественно из аутигенных рудных бобовин, оолитов и терригенных обломков кварца, халцедона, ранее образованных



**Рис. 2.** Фосфатные минералы и ильменит в хлорит-гидрогетитовых оолитах: а – вкрапление кальциевого фосфата (анапат) (изображение в обратно-рассеянных электронах); б – «дендритовидные» агрегаты фосфата редкоземельных элементов (куларит) (изображение в обратно-рассеянных электронах), в – призматическое зерно монацита с трещинками дезинтеграции (изображение в обратно-рассеянных электронах); г – вкрапления ильменита (а–в – изображение в обратно-рассеянных электронах, г – во вторичных электронах)



**Рис. 3.** Микровключения в гидрогетитовых оолитах фракции  $-0,5...+0,2$  мм (изображения в обратно-рассеянных электронах): а – концентрические зоны и микровключения редкоземельных фосфатов (куларит); б – галенит среди фосфатов редкоземельных элементов в микротрещинке; в – единичное вкрапление рутила

оолитов. Бобовины в частых случаях имеют коричневатый, коричневатый-бурый цвет и сферические, неправильные формы с однородной, концентрически-зональной и сложной внутренней структурой. «Затравками», которые слагают ядро оолита, служат кварц, сгустки глинистых минералов, глауконит, гетит, гидрогетит, лептохлорит, редко магнетит. В теории оолитообразования эти «затравки» представляют собой центры коагуляции, вокруг которых происходил распад коллоидных растворов и формирование гидроксидов Fe.

По морфологии и окраске оолиты можно разделить на коричневатые-черные с более правильными очертаниями, коричневатые-бурые со сферическими неправильными очертаниями и сложные (цементация гидрогетитом нескольких ранее образованных оолитов). Первые имеют преимущественно гидрогетитовый состав (основные Fe-содержащие минералы – гидрогетит, гетит, остальные – лептохлорит, лепидокрокит), а вторые – хлорит-гидрогетитовый состав (гидрогетит, лептохлорит и глауконит, лепидокрокит, сидерит, гетит соответственно) со значительными включениями обломочных минералов.

На рентгенофлуоресцентном микроскопе был определен средний элементный состав гидрогетитовых и хлорит-гидрогетитовых оолитов.

В связи с преобладанием алюмосиликатных минералов (лептохлорит, глауконит) последние отличаются пониженным содержанием Fe, P, но повышенными – Si, K. Хлорит-гидрогетитовые оолиты характеризуются следующим средним элементным составом (по данным 270 измерений РФА): Fe 37,1 %, Si 17,2 %, P 0,24 %, Al 2,65 %, K 2,4 %, Ca 0,45 %, Ti 0,2 %, V 0,2 % и др.; гидрогетитовые оолиты (по данным 270 измерений РФА): Fe 58,59 %, Si 2,73 %, P 1,17 %, Al 3,17 %, K 0,15 %, Mg 0,15 %, Ca 0,16 %, Ti 0,09 %, V 0,16 % и др.

Наиболее разнообразный минеральный состав свойственен оолитам и бобовинам хлорит-гидрогетитового состава размером более 0,5 мм. В них постоянно фиксируются повышенные содержания Ti и Zr, которые связаны с включениями ильменита (рис. 2, г), рутила, псевдобрукита ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ ) и циркона, также отмечается повышенное содержание фосфора, который концентрируется в микровключениях анапайта ( $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}[\text{PO}_4]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), куларита, монацита (см. рис. 2, в). Включения титанистых минералов (размер их от 1 до 80–100 мкм) представлены ильменитом и, предположительно, псевдобрукитом ( $\text{TiO}_2$  20–30 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  65–70 %) размером 10–20 мкм. Иногда отмечается до десятка титанистых включений в одном рудном зерне. Также в хлорит-гидрогетитовых бобовинах



нах фиксируются вкрапления циркона размером 30–100 мкм. По химическому составу вкрапления минералов Ti и Zr в оолитах и бобовинах схожи с рудными минералами Туганского ильменит-цирконового россыпного месторождения (40 км на северо-восток от Томска), что позволяет сделать предположение о едином источнике сноса этих компонентов.

Размер выделений фосфатов от 1–2 до 50 мкм. При этом только вкрапления анапайта имеют размеры 20–50 мкм, остальные фосфаты распространены в виде микровключений, концентрических зон (рис. 3, а), дендритовидных агрегатов (см. рис. 2, б); последние наблюдаются только в бобовинах хлорит-гидрогетитового состава. В гидрогетитовых оолитах с ритмично-зональным строением преобладает куларит, который образует микровключения либо отдельные прерывистые кольцевые зоны (см. рис. 3, а). В единичных случаях встречаются в значительной степени дезинтегрированные зерна призматического габитуса (см. рис. 2, в), по составу отвечающие монациту с повышенным содержанием La и Ce (по 18–20 %). Присутствие галенита и сфалерита (см. рис. 3, б) в оолитах обеспечивает высокие содержания Zn и Pb. Также в гидрогетитовых оолитах отмечаются единичные обломки рутила (см. рис. 3, в).

### Выводы

1. В «рыхлом» типе оолитовых руд наибольший выход имеет фракция –0,5...+0,2 мм, где и концентрируется основной объем рудных компонентов. Перспективными для обогащения на западном участке можно считать фракцию 1–2 мм, на восточном – фракцию –1...+0,1 мм.
2. Элементный состав «рыхлых» руд для западного участка характеризуется средним содержанием Fe 35 %, P 0,41 %, V 0,16 %, для восточного участка – 38, 0,32 и 0,18 % соответственно.
3. Благородные и редкие элементы в «рыхлых» рудах не имеют промышленно значимых содержаний.
4. Примесь P в рудах в среднем составляет 0,43 %. Фосфор в оолитах представлен в виде куларита (субмикронные вкрапления размером ме-

нее 10 мкм), монацита (до 40 мкм), анапайта (5–60 мкм). Остальные вредные примеси (As, Cu, Zn, Pb и Sn) не превышают допустимых значений для оолитовых руд.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ВИУ ИПР № 114 2014.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабин, А. А.** Бакчарское железорудное месторождение (геология, закономерности размещения и генезис железных руд) : Автореф. дис. ... к.г.-м. н. [Текст] / А. А. Бабин. – Томск : ТПИ, 1969.
2. **Западно-Сибирский** железорудный бассейн [Текст] / Под ред. Ф. Н. Шахова. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1964. – 447 с.
3. **Карепина, К. В.** Редкие и радиоактивные элементы в железных рудах Западно-Сибирского железорудного пояса на примере Бакчарского узла (Томская область) [Текст] / К. В. Карепина, В. А. Домаренко, Л. П. Рихванов // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 6. – С. 29–35.
4. **Нетрадиционное** гидрогенное оруденение металлов платиновой группы в чехле Западно-Сибирской платформы [Текст] / Г. М. Шор, Э. А. Ланда, Л. Г. Гусинова [и др.] // Платина России. Проблема развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI в. Т. III. – М., 1999. – С. 345–352.
5. **Николаева, И. В.** Бакчарское месторождение оолитовых железных руд [Текст] / И. В. Николаева. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1967. – 129 с.
6. **Перспективы** освоения Бакчарского железорудного месторождения, Томская область [Текст] / А. К. Мазуров, Г. Ю. Боярко, В. Г. Емешев, А. В. Комаров // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 64–70.
7. **Пшеничкин, А. Я.** Проявление благородно-металльной минерализации в осадочных железных рудах Бакчарского месторождения [Текст] / А. Я. Пшеничкин, А. Ф. Коробейников, Н. А. Колпакова // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири : Матер. межрегион. науч.-практ. конф. – Томск : ТПУ, 2005. – С. 274–277.

© М. А. Рудмин, 2014