

УДК 553.21

## Тантало-ниобаты в породах федотовской свиты верхнего рифея (Средний Урал)

**Б.М. Осовецкий<sup>а</sup>, С.Б. Суслов<sup>б</sup>, И.В. Бадьянова<sup>а</sup>**<sup>а</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: opal@psu.ru, kataev7@psu.ru<sup>б</sup>АО «Геокарта-Пермь»

614065, Пермь, ул. Геологов, 29. E-mail: geokarta.perm@yandex.ru

*(Статья поступила в редакцию 20 августа 2019 г.)*

Рассмотрены петрографические особенности пород федотовской свиты верхнего рифея на западном склоне Среднего Урала. Описаны минеральные формы нахождения тантало-ниобатов (ильменорутит, танталорутит, иттроколумбит, поликраз) и геохимические закономерности распределения концентраций ниобия в разрезах скважин. Установлена приуроченность высоких концентраций ниобия к прослоям метариолитов и metabазальтов. Выявлена ритмичность в распределении ниобия по разрезу углисто-серицит-кварцевых сланцев с чередованием прослоев с высокими и низкими концентрациями. Результаты исследований могут быть использованы для решения теоретических вопросов формирования черносланцевых формаций, а также при прогнозировании поисковых работ на комплексные россыпепроявления.

Ключевые слова: *федотовская свита, черные сланцы, тантало-ниобаты, Средний Урал, петрография, минералогия, геохимия, электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ.*

DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.332

### Введение

В настоящее время породы черносланцевых формаций считаются одними из наиболее перспективных источников благородных металлов и урана. Кроме того, в этих породах отмечается повышенное содержание многих других элементов, в частности TR, W, Mo, Co, Ti, Zr и др.

Один из крупнейших в мире поясов распространения черносланцевых пород протянулся вдоль Урала и Тимана. В пределах этого пояса выделено множество черносланцевых комплексов разного возраста, оценен характер их металлоносности и перспективы её освоения. Так, перспективными на золотое оруденение считаются рифейские черные сланцы Среднего Тимана (Голубева и др., 2018). На Северном Урале аналогичные прогнозы сделаны для черных сланцев Вишерско-Кутимского антиклинория (Петров и др., 2015). На территории западного склона Среднего Урала представителями черносланцевых формаций являются породы федотовской свиты верхнего рифея (Аблизин и др., 1982; Суслов, 2018), общая оценка ме-

таллоносности которых наряду с другими районами Урала приведена в работе А.В. Маслова и др. (2017). На Южном Урале также с черносланцевыми толщами силура связываются высокие перспективы на золотое оруденение (Рыкус, Сначев, 1999). Другими перспективными на золото объектами здесь считаются раннекаменноугольные углеродисто-карбонатно-терригенные комплексы (Арифуров и др., 2006; Баранников, 2006). Обобщающими по нескольким районам Южного Урала являются работы А.В. Сначёва и др. (2012). Важными в теоретическом отношении и содержащими обширный фактический материал по разным районам Урала являются работы Я.Э. Юдовича и др., (1990), Я.Э. Юдовича, М.П. Кетрис (1994), В.Н. Сазонова и др. (2011).

На западном склоне Среднего Урала в 2012–2014 гг. были проведены поисковые работы на выявление месторождений рудного золота в углеродистых терригенно-карбонатных отложениях. Основанием для постановки таких работ послужили результаты ранее выполненных исследований геологического строения и вещественного состава пород (Золоев и др., 2001; Волченко и

др., 2006; Мазеин и др., 2010; Петров, 2014). В итоге были получены весьма интересные данные не только по золотоносности, но и по многим другим типам минерализаций, а также по петрографии, минералогии и геохимии. Краткая характеристика основных типов минерализации приведена в работе И.В. Бадьяновой и др. (2016). Анализу вулканитов в составе разреза свиты посвящена работа С.Б. Сулова (2018).

Настоящая статья посвящена анализу тантал-ниобиевой минерализации в породах федотовской свиты. Ранее наличие повышенных концентраций ниобия было отмечено в черносланцевых породах саткинской свиты нижнего рифея (Маслов и др., 2017). Широко распространено тантал-ниобиевое оруденение в магматических комплексах Южного Урала более молодого возраста (260-270 млн лет). В частности, в миаскитах ильмено-вишневогорского комплекса рудоносные альбититы содержат разнообразный комплекс тантал-ниобиевых минералов (пироклор, ильменорутил, ферсманит, эшинит и др.).

### **Общая характеристика объекта исследования**

Породы федотовской свиты в геотектоническом отношении приурочены к Каменногорскому антиклинорию. В стратиграфическом отношении они являются составной частью мощного верхнерифейского комплекса, сформированного в обстановках внутриконтинентального моря рифтогенной пассивной континентальной окраины. Геологическое положение федотовской свиты в разрезе докембрия, история ее формирования и другие особенности приведены в ранее опубликованных работах (Аблизин и др., 1982; Курбацкая, 1986; Петров, 2014; Сулов, 2018).

По последним данным (Сулов, 2018), в составе федотовской свиты выделяются три подсвиты. Нижняя подсвита сложена углисто-серицит-кварцевыми сланцами мощностью до 150 м. Ее основные текстурные признаки – тонкая полосчатость, линзовидность, местами тонкослоистость – свидетельствуют о прибрежно-морском генезисе осадков. Толща образовавшихся затем пород была переработана разнообразными наложенными

процессами метасоматоза, которые привели к развитию в ней процессов доломитизации, пиритизации, окварцевания, ожелезнения, лейкоксенизации и др.

Средняя подсвита представлена вулканогенными породами мощностью около 300 м. В первичном залегании по форме залежей и минеральному составу они соответствовали в основном риолитам или их туфам с прослоями базальтов (до 80 м). В дальнейшем вулканогенная толща была в высокой степени преобразована наложенными метасоматическими процессами (серицитизации, карбонатизации, окварцевания, магнетитизации, гематитизации, хлоритизации, альбитизации и др.). Под их воздействием образовались метариолиты и метабазальты. Наиболее преобразованные разности рассматриваются как разнообразные метасоматиты.

Верхняя подсвита, как и нижняя, представлена углисто-серицит-кварцевыми сланцами мощностью до 700 м. В отличие от нижней в ней встречаются прослои кварцитопесчаников и окремнелых известняков. Некоторые отличия прослеживаются и в характере наложенных процессов. В частности, одним из характерных результатов метасоматоза являлась интенсивная лейкоксенизация углистого вещества.

### **Методика исследования**

Материалом для лабораторных исследований послужил керн скважин, пробуренных сотрудниками ОАО «Пермгеолнеруд» в ходе выполнения проекта по изучению золотоносности пород федотовской свиты. Этими скважинами глубиной до 200 м вскрыт её разрез в нескольких точках (рис. 1, 2). Из керна отобраны пробы для шлихового опробования, литолого-петрографических и электронно-микроскопических исследований, а также навески для выполнения рентгенофлуоресцентного анализа.

Представительные пробы массой от 3 до 10 кг подвергались дроблению на щековой дробилке ШД-6 (Россия) до размерности частиц менее 0,25 мм. После этого в лотке проводилась отмывка дробленого материала с получением «серого» шлиха. Последний разделялся в бромформе на легкую и тяжё-

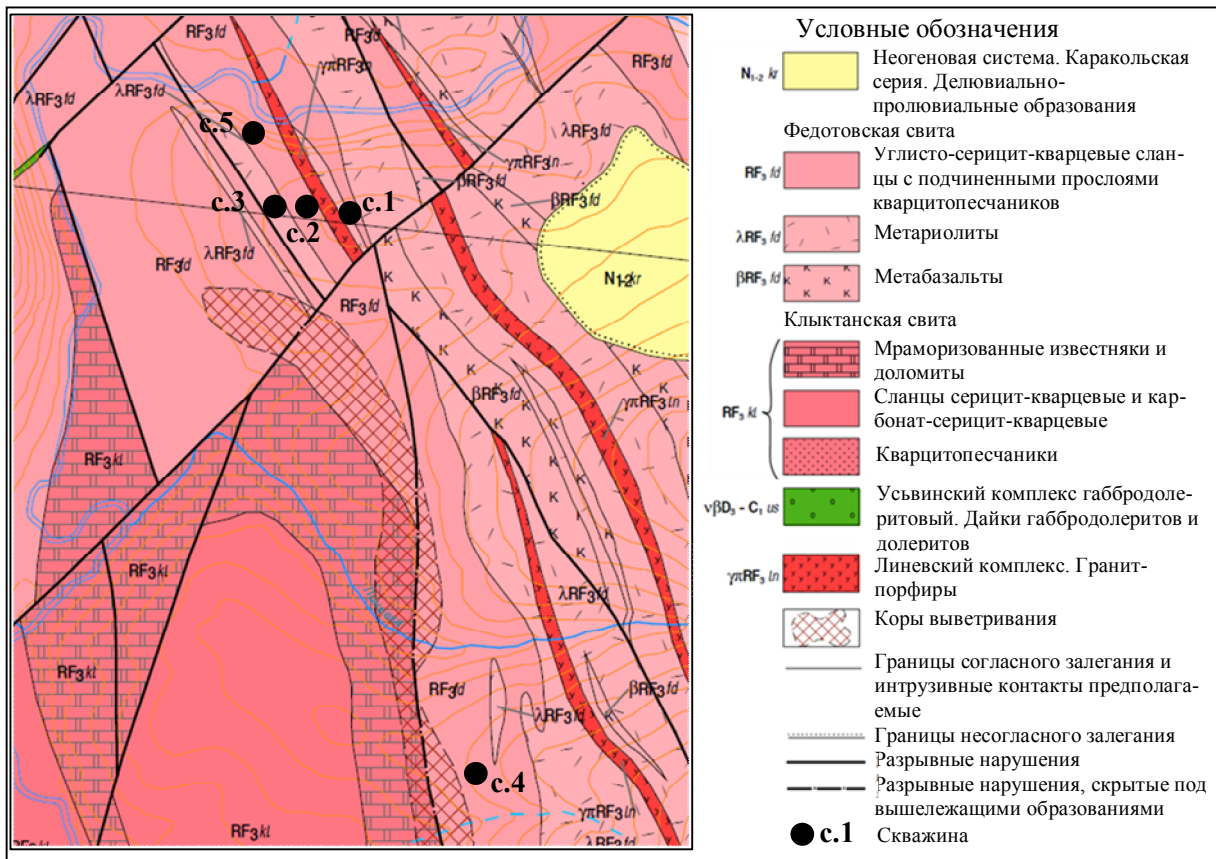


Рис. 1. Фрагмент геологической карты района исследования с точками отпробования отложений федотовской свиты, масштаб 1:25 000 (Сулов, 2018)

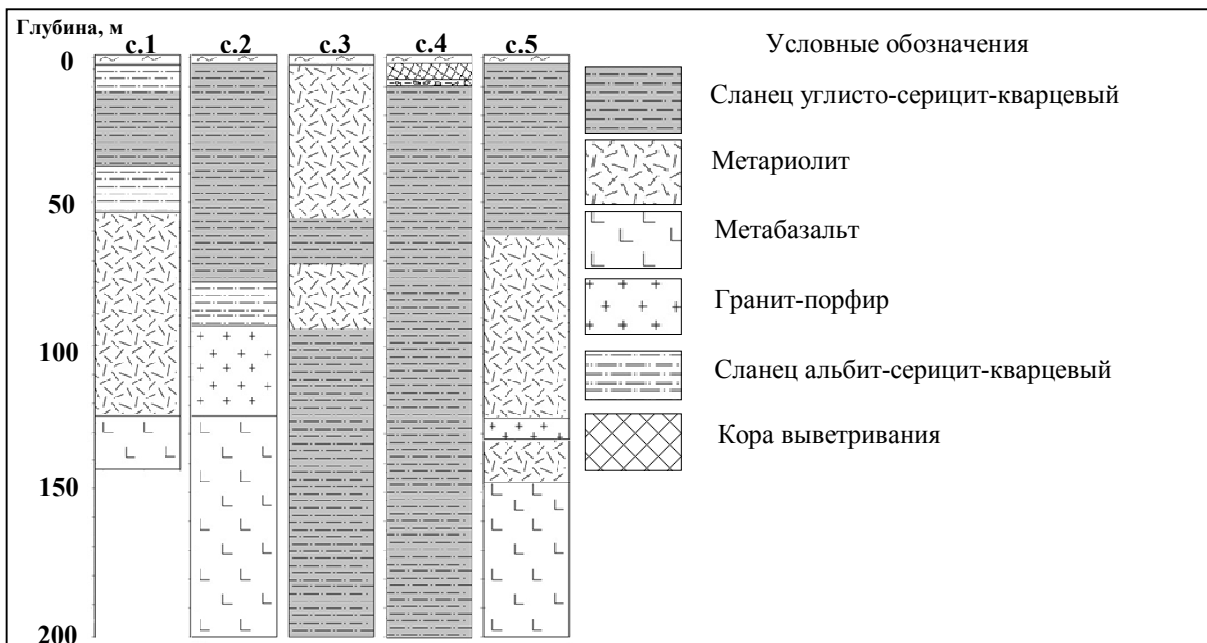


Рис. 2. Геологические колонки керна скважин, вскрывших отложения федотовской свиты

лую фракции. Минеральный состав тяжелой фракции определялся под бинокулярным микроскопом Nikon 745 MZ (Япония). Диагностика минералов, помимо традиционных методов (иммерсионный метод с использо-

ванием поляризационного микроскопа, определение физических свойств и т.д.), производилась также с использованием микронзондового анализа. Всего было изучено 130 шлихов.

Из наиболее характерных типов пород федотовской свиты, предоставленных для изучения С.Б. Суловым, в шлифовальной мастерской кафедры минералогии и петрографии ПГНИУ были изготовлены аншлифы. Они были сфотографированы на многоцелевом стереомикроскопе Leica MZ 16 фирмы (ФРГ) с получением цветных фотоснимков. Далее аншлифы были исследованы на сканирующем электронном микроскопе JSM 6390LV (фирма JEOL, Япония) с микрофотографированием тантал-ниобиевых минералов. Их первичная диагностика и химический состав определены микрозондовым методом с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY 350 (фирма Oxford Instruments, Великобритания) (аналитик Б.М.Осовецкий). Режим работы микроскопа: рабочее расстояние – 12 мм, сила тока – 15 мА, напряжение – 20 кВт. Используются эталоны фирмы-изготовителя микроскопа. При определении химического состава мельчайших зерен (менее 5 мкм) в рентгеновский энергетический спектр попадали отражения от окружающего минерал вещества, которые исключались из анализа с последующим нормированием результатов. Попутно на основе качественного микрозондового анализа определялся минеральный состав породы. Всего детально описано 30 аншлифов (углеродистые серицит-кварцевые сланцы, метасоматиты, метариолиты, metabазальты и др.), выполнено 100 количественных микрозондовых анализов.

Содержания ниобия в породах федотовской свиты, наряду с другими элементами (всего 27 элементов), определены с применением рентгенофлуоресцентного анализа. Всего выполнено около 500 анализов. Использована аппаратура Сектора наноминералогии ПГНИУ: для пробоподготовки (планетарная шаровая мельница для измельчения и подготовки проб «Pulverisette 5», ФРГ, исполнитель Н.А. Бусыгина, и полуавтоматический лабораторный гидравлический пресс для изготовления таблеточных проб Vaneox 25t, ФРГ, исполнитель А.П. Седунова) и для аналитических исследований (рентгенофлуоресцентный спектрометр S8 Tiger фирмы Bruker, ФРГ, аналитик К.П. Казымов). Использована калибровка по программе TRACE.

## Петрография

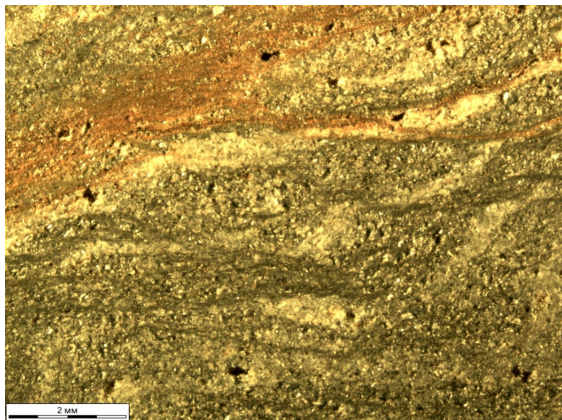
Комплекс пород, образующих геологический разрез федотовской свиты, очень разнообразен. В его составе можно выделить следующие генетические группы: 1) метаморфические породы (углеродистые и неуглеродистые кристаллические сланцы); 2) магматические породы (интрузивные и вулканогенные); 3) метасоматические образования (альбитизированные сланцы, железные сланцы, эпидотизированные эффузивные породы, окварцованные породы, доломитизированные вулканиты, березиты и др.); 4) осадочные породы, находящиеся на стадии метагенеза (кварцитопесчаники, мраморизованные известняки) и катагенеза (окварцованные известняки).

*Кристаллические сланцы* имеют обычно углисто-серицит-кварцевый минеральный состав (рис. 3). Содержания кварца (в нижней подсвете 30–60 %, в верхней – 40–65 %) и серицита (соответственно 20–55 и 18–30 %) колеблются в очень широких пределах. В результате, особенно в разрезе нижней подсветы, одни прослои сланцев являются преимущественно кварцевыми по составу, другие – слюдястыми. Обычное содержание углстого вещества – 5–15 %, однако в отдельных прослоях сланцев оно почти полностью отсутствует. Типичными примесями являются гидроксиды железа и пирит. Кроме того, в определенных участках присутствуют метасоматически измененные разновидности сланцев: хлорит-серицит-гематит-кварцевые, магнетит-хлорит-серицитовые, доломитизированные и др.

В сланцах отмечены повышенные (по сравнению с кларком) концентрации Ti, Zr, Nb, TR. Минералами-носителями этих элементов, как показали результаты детального изучения минерального состава пород, в т.ч. тяжелой фракции, являются типичные минералы зрелых кор выветривания – ильменит, рутил, лейкоксен, циркон, тантало-ниобаты, монацит, алланит и др.

Типичными *интрузивными* магматическими породами являются *гранит-порфиры*, в минеральном составе которых преобладают полевые шпаты, кварц и слюды. Акцессории представлены цирконом, апатитом, алланитом, тантало-ниобатами, ильменитом,

лейкоксеном, гематитом, пиритом и др. (рис. 4). Внедрение гранит-порфиров способствовало широкому развитию процессов метасоматоза (окварцевание, карбонатизация, хлоритизация и др.) в породах фэдотов-

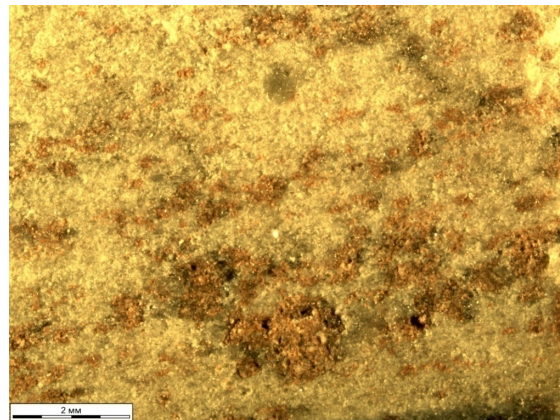


**Рис. 3.** Углисто-серицит-кварцевый сланец: черные прожилки – углеродистое вещество, бурые – железистые агрегаты, светлые – кварцево-серицитовые прослои

Вулканогенные породы представлены метариолитами и метабазальтами. Среди метариолитов различают порфировые и афировые разновидности. Порфировые метариолиты отличаются присутствием вкрапленников (20–35%) кварца и полевых шпатов размером до 4 мм, в то время как преобладающая масса вещества апостекловатая. Афировые метариолиты почти полностью апостекловатые. Наиболее характерным аксессуарным минералом в метариолитах является алланит. Часто метариолиты сильно серицитизированы и карбонатизированы (рис. 5). Метабазальты мощностью до 100 м присутствуют в виде прослоев в риолитах. В их минеральном составе преобладают альбит (20–40%), хлорит (15–40%), присутствуют актинолит, карбонаты, эпидот, слюды и др.

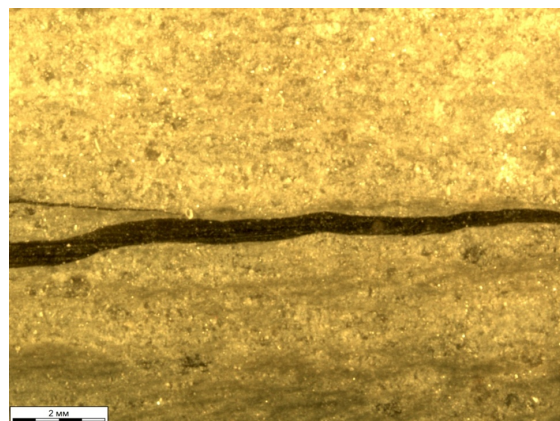
Комплекс метасоматитов весьма разнообразен и сильно различается по минеральному составу в зависимости от исходной породы и характера наложенных процессов. Типичными метасоматическими процессами являются окварцевание, альбитизация, доломитизация, эпидотизация, лейкоксенизация, серицитизация и березитизация пород. Многие метасоматиты обогащены магнетитом и хлоритом. Характерным признаком активного воздействия процессов метасоматоза яв-

ской свиты, особенно вблизи контактов, и сопровождалось гидротермальными проявлениями с высокими содержаниями сульфидов (Суслов, 2018).



**Рис. 4.** Гранит-порфир: светлые участки – слюды, серые – кварц, бурые – полевые шпаты

ляется обогащение пород определенными индикаторными минералами: редкоземельными (алланит, паризит, монацит, ксенотим), карбонатными (анкерит, кальцит, доломит), сульфидами (пирит, пирротин, халькопирит,



**Рис. 5.** Метариолит порфировый, серицитизированный и карбонатизированный

галенит, сфалерит, арсенопирит, кобальтин) и др.

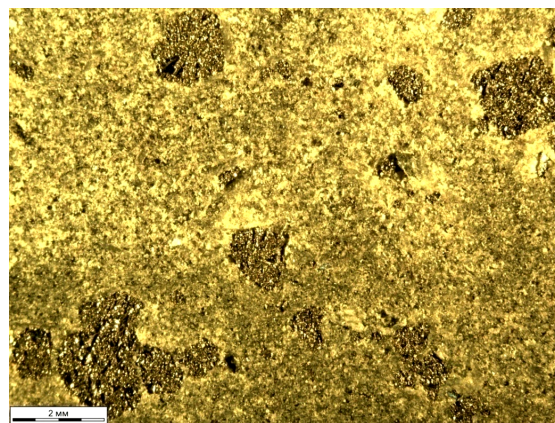
Наиболее мощные зоны с интенсивной метасоматической проработкой связаны с вулканогенными породами. В процессе метасоматоза углистое вещество замещается лейкоксеном или гидроксидами железа. Характерными петрографическими типами ме-

тасоматитов являются магнетит-хлорит-серицит-кварцевые, апатит-кварц-доломит-альбитовые, доломит-кальцит-альбитовые, кварц-магнетитовые, мусковит-кварц-пиритовые, рутил-магнетит-серицит-кварцевые, алланит-рутил-альбит-серицитовые и др. (рис. 6-9).

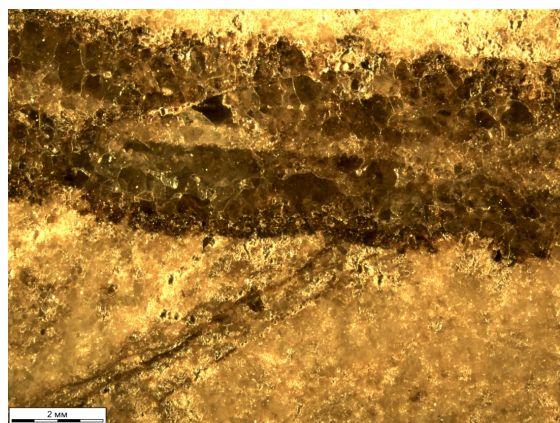


**Рис. 6.** Метасоматит серицитовый (березит) с органикой (черное)

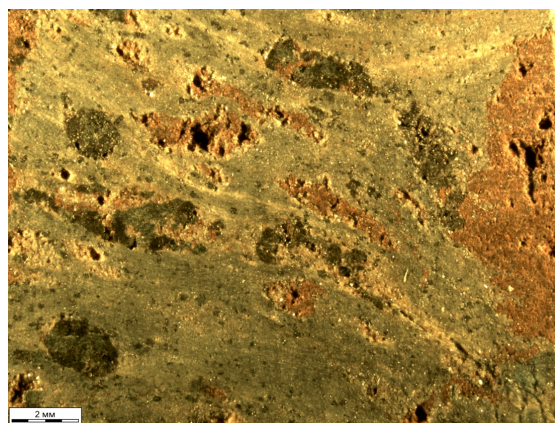
Осадочные породы, находящиеся на стадии метагенеза, представлены линзообразными прослоями *кварцитопесчаников* и *мраморизованных известняков* в разрезе верхней подсвиты. Результатом воздействия процессов метасоматоза является присутствие *окремнелых известняков*.



**Рис. 7.** Метасоматит: зеленые участки – хлорит, светлые – доломит и кварц, черные – магнетит



**Рис. 8.** Метасоматит альбит (темные)-карбонатный (светлые)



**Рис. 9.** Метасоматит альбит (темные)-анкерит (бурые)-серицитовый (серовато-зеленоватые)

## Минералогия

*Тяжелая фракция.* Изучение состава тяжелой фракции пород федотовской свиты дает обширную информацию об условиях их формирования и деталях вещественного состава. Например, очень часто в составе тяжелой фракции преобладают мелкие обломки сланцев, что обусловлено насыщенностью их включениями сульфидов. Характерно, что в других прослоях обломки сланцев могут полностью отсутствовать в составе тяжелой

фракции. Выход тяжелой фракции обычно колеблется от 0,03 до 0,31 %, но иногда резко снижается до 0,01 % и менее или, наоборот, повышается до 1,2 % в тех же типах пород.

Обработка данных по минеральному составу тяжелых фракций пород федотовской свиты показала, что для них характерны 4 группы минеральных ассоциаций: 1) зеленоцветные силикатные (пироксеновая, амфиболовая, эпидотовая), 2) сульфидные (пиритовая, пирротиновая, халькопиритовая),



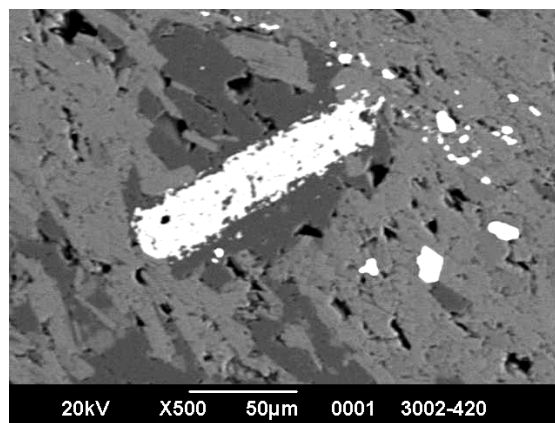
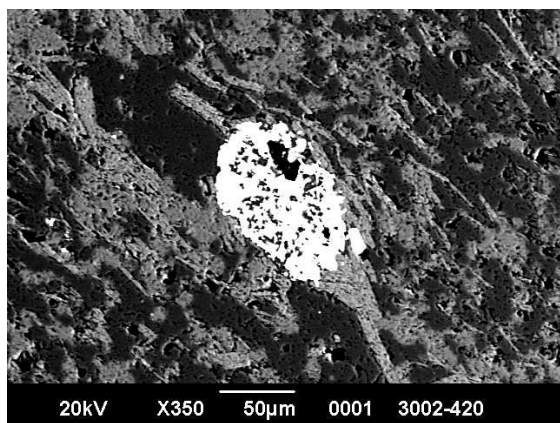


Рис. 10. Зерна ильменорутила в порфировом метариолите

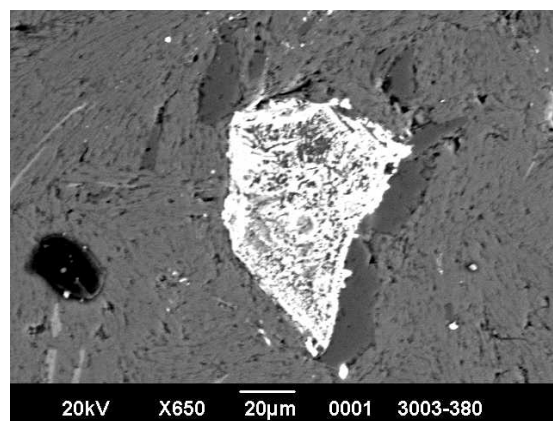
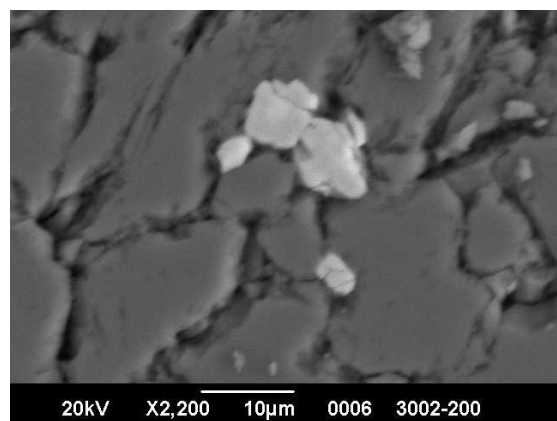


Рис. 11. Зерна ильменорутила в микропорфировом метариолите

Рис. 12. Ильменорутил в гранит-порфире

Такие зерна имеют небольшие размеры (до 10 мкм), они относительно «свежие» и приурочены к мелким порам и трещинам (рис. 10, 11, табл. 1). Наоборот, ильменорутил в гранит-порфирах отличается более крупными размерами (обычно более 100 мкм) (рис. 12), повышенной пористостью, пониженным содержанием ниобия и полным отсутствием тантала.

**Танталорутил** встречается очень редко и только в порфировых метариолитах с высоким содержанием ильменорутила. В нем доля пентаоксида тантала достигает 21,86 %, а пентаоксида ниобия снижается до 9 %. Уменьшается также содержание железа, появляется примесь тория (табл. 1).

Зерна типичного ильменорутила занимают в породе определенную позицию: они обычно приурочены к контактам зерен кварца с альбитом или серицитом. Форма более крупных зерен удлиненная, овальная или угловатая.

Более мелкие частицы представляют, вероятно, другую генерацию ильменорутила, которая локализуется в пустотно-трещинном пространстве породы.

Таблица 2. Химический состав высокониобиевых зерен ильменорутила (1,2,4,5) и танталорутила (3) в образцах гранит-порфира, мас. %

Оксид	1	2	3	4	5
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	45,69	38,29	32,12	44,52	46,06
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,97	3,91	32,96	2,32	7,61
TiO <sub>2</sub>	31,04	33,63	20,52	29,67	32,91
FeO*	8,19	11,43	10,67	12,62	7,44
MnO	0,20	0,32	0,58	-	-
CaO	1,26	0,75	-	0,85	0,72
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,80	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,17	1,97	1,67	2,70	-
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,87	-	-	-	-
ThO <sub>2</sub>	3,50	3,90	1,48	4,15	3,01
UO <sub>3</sub>	0,73	1,64	-	-	0,62
Na <sub>2</sub> O	0,24	-	-	0,56	-
Сумма	96,86	95,84	100	98,19	98,37



Они не резорбированы, отсутствует пористость, поверхность сравнительно ровная. Кроме того, в гранит-порфирах нередко встречаются необычные зерна ильменорутила и танталорутила с очень высокими содержаниями ниобия (до 48 %  $Nb_2O_5$ ) и реже тантала, которые превышают содержание диоксида титана (табл. 2). Характерно также присутствие в них тория и редких земель. Эти зерна отличаются высокой степенью

преобразования, что проявляется в следах интенсивного растворения, присутствием внешней оболочки и другими особенностями (рис. 13, 14).

Среди тантало-ниобатов в породах федотовской свиты широко распространены иттрийсодержащие, которые можно отнести к разновидностям двух минеральных видов: *иттроколумбита* и *поликразита* (рис. 15–17, табл. 3–5).

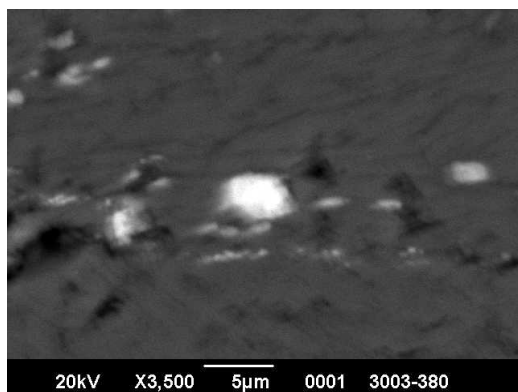


Рис. 13. Зерно ильменорутила (светлое) в гранит-порфире

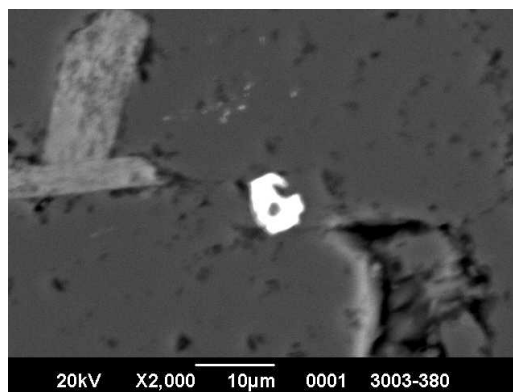


Рис. 14. Резорбированный кристалл ильменорутила в гранит-порфире

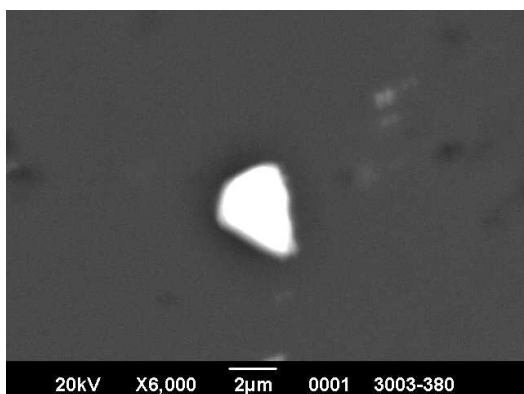


Рис. 15. Зерно иттроколумбита в кварце гранит-порфира

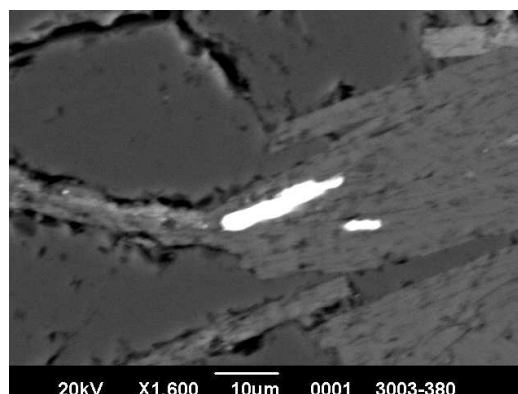


Рис. 16. Зерна иттроколумбита в слюдяной прожилке в гранит-порфире

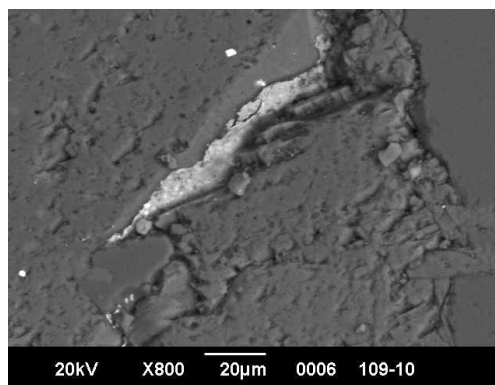
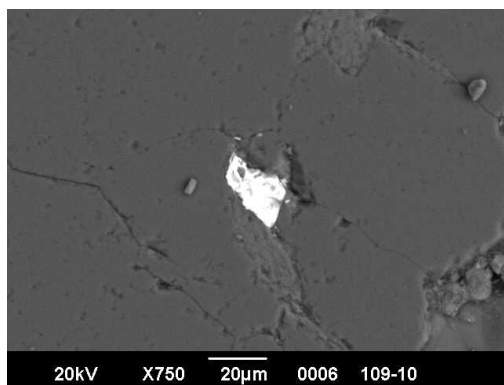


Рис. 17. Выделения иттроколумбита в порфировом метарйолите

**Таблица 3.** Химический состав зерен иттроколумбита в сланцах и метариолите, мас. %

Оксид	Хлорит-серицит-кварцевый сланец		Метариолиты					
	SiO <sub>2</sub>	15,65	3,46	9,03	4,54	3,96	8,10	-
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	53,03	49,30	62,41	64,92	60,89	60,97	55,38	51,02
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	1,02	0	0	0	0	4,88	7,33
TiO <sub>2</sub>	0,94	0,88	-	0,60	-	-	-	0,45
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,37	6,93	18,27	24,22	25,18	16,89	24,88	23,86
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,96	1,47	-	-	0	1,48	5,10	6,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	1,64	-	1,80	-	-	-
FeO*	15,40	32,57	5,90	3,02	4,55	5,57	5,05	4,90
MnO	-	0,24	0	-	-	-	0	0
ThO <sub>2</sub>	1,84	1,90	-	-	0	2,11	3,21	3,99
UO <sub>3</sub>	-	-	-	-	0	-	2,55	2,69
CaO	0,81	0,77	2,75	1,63	1,89	2,90	-	-
Сумма	99,97	98,54	100	98,93	98,27	98,02	101,05	100,88

**Таблица 4.** Химический состав высокотанталовых разностей поликразы в гранит-порфирах, мас. %

Оксид	1	2	3	4
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34,97	38,75	31,74	25,94
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	13,71	13,69	23,39	44,53
TiO <sub>2</sub>	28,10	25,74	23,26	14,72
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,31	11,50	5,05	10,91
FeO*	9,96	7,75	11,97	0,45
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,72
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,87	1,39	2,38	-
ThO <sub>2</sub>	3,22	1,18	1,21	2,72
UO <sub>3</sub>	0,86	0	1,00	0
Сумма	100	100	100	99,99

**Таблица 5.** Химический состав низкотанталовых разностей поликразы в гранит-порфирах, мас. %

Оксид	1	2	3
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	41,29	43,28	45,30
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,85	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	1,42	-
TiO <sub>2</sub>	29,35	27,56	27,90
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,57	7,79	17,36
FeO*	0,49	11,30	0
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,75	2,83	1,90
ThO <sub>2</sub>	5,50	3,13	5,25
UO <sub>3</sub>	0,81	-	0
Сумма	98,76	98,16	97,71

## Геохимия

Кларк ниобия для сланцев составляет 11 г/т. Обычно повышенными концентрациями ниобия отличаются пегматиты, редкометалльные граниты, карбонатиты и некоторые другие магматические породы. Для метаморфических пород тантало-ниобаты не характерны.

Обработка данных нескольких сотен рентгенофлуоресцентных анализов для полного разреза федотовской свиты по 5 скважинам показала, что диапазон колебания концентраций ниобия составляет от 1 до 388 г/т. Главной причиной, контролирующей содержание ниобия, является различие петрографического состава пород. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в эффузивных породах (метариолитах), несколько

ниже – в интрузивных (гранит-порфирах). При этом особенно обогащены ниобием метариолиты с порфировой структурой. В их минеральном составе преобладают кварц, альбит, серицит и хлорит, широко распространены микропертитовые сростки.

В собственно черносланцевых породах (серицит-кварцевые сланцы, как углистые, так и без углеродистого вещества) средние для скважин концентрации ниобия в пределах от 20 до 31 г/т. Ниобий не характерен также для метабазальтов (23–76 г/т). Метасоматически измененные сланцы отличаются несколько повышенными концентрациями ниобия (в среднем для скважин – от 70 до 83 г/т) (табл. 6).

Другим существенным фактором, влияющим на распределение ниобия в разрезе федотовской свиты, является присутствие в

разрезе нескольких фаз эффузивных излияний с разной степенью металлоносности. В этом отношении весьма показательным сравнением средних содержания ниобия в метариолитах по двум соседним скважинам (скв. 1 и скв. 3), которые различаются почти в три раза.

Наконец, существенные вариации содержания ниобия наблюдаются и в сланцах, даже в разрезе одной и той же скважины. При низком геохимическом фоне ниобия в сланцах в некоторых прослоях содержатся его повышенные концентрации, нередко превышающие 100 г/т (табл. 7).

В некоторых скважинах наблюдаются несколько прослоев сланцев с высокими концентрациями ниобия, а их чередование в разрезе имеет ритмический характер. Для примера приведены данные по одной из скважин (скв. 4), в которой выявлено ритмическое чередование прослоев сланца с низкими (29–84 г/т) и высокими (134–192 г/т) концентрациями ниобия (табл. 8). При этом обогащенные ниобием прослои имеют меньшую мощность.

Данную закономерность можно объяснить особенностями процессов осадконакоп-

ления в позднерифейском бассейне седиментации, а именно: специфическими условиями фациальной сортировки тонкообломочного материала в прибрежной зоне моря. Накопление в большом количестве тонкозернистых ниобиевых минералов в прибрежно-морских условиях, вероятно, происходило под влиянием волновой сортировки с формированием «естественных шлихов» в относительно стабильных условиях.

Повторяемость в разрезе прослоев с повышенным содержанием ниобия можно объяснить закономерной периодичностью этого процесса, что отмечается и в разрезах древних титано-циркониевых россыпей.

Судя по высокому значению коэффициента корреляции, характеризующего связь содержания ниобия и циркония (+0,89), а также ниобия и церия (+0,72), тантал-ниобиевые минералы попадают в прибрежно-морские осадки позднерифейского возраста вместе с зернами циркона и монацита. Высокая степень сортировки этих минералов по гидравлической крупности подтверждается близким и довольно узким диапазоном их размерности (порядка 0,05–0,1 мм).

**Таблица 6.** Концентрации ниобия в породах фэдотовской свиты, г/т

Показатель	Скв. 1				Скв. 3		Скв. 4	Скв. 5			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Максимальный	157	34	152	74	171	388	256	57	224	120	157
Минимальный	22	15	21	17	6	74	4	6	21	102	29
Средний	70	20	70	23	28	<b>191</b>	83	31	<b>125</b>	<b>112</b>	76
Число анализов	29	27	24	13	88	45	59	25	26	3	4

Примечания: 1 – метасоматически измененные альбит-серицит-кварцевые сланцы, 2 – углистые серицит-кварцевые сланцы, 3, 6, 9 – метариолиты, 4, 11 – metabазальты, 5 – черносланцевые породы, 7 – метасоматически измененные сланцы, 8 – углистые сланцы, 10 – гранит-порфиры.

**Таблица 7.** Вариации средних содержаний ниобия в прослоях черных сланцев

Скв. 1			Скв. 2			Скв. 3		
Интервал, м	Содержание, г/т	Число проб	Интервал, м	Содержание, г/т	Число проб	Интервал, м	Содержание, г/т	Число проб
4,2–11,5	43	6	2,7–15,0	34	12	148,1–165,3	22	8
13,5–29,2	18	15	15,0–16,3	<b>121</b>	1	165,3–168,5	<b>169</b>	1
39,8–48,0	<b>129</b>	9	16,3–36,5	20	14	168,5–179,0	18	8
96,9–110,5	38	6	36,5–52,6	17	11	–	–	–
–	–	–	80,3–87,7	88	6	–	–	–

**Таблица 8.** Средние значения концентраций ниобия в прослоях черных сланцев (скв. 4)

Интервал, м	Содержание, г/м	Число проб
13,0–20,5	<b>166</b>	3
20,5–44,0	29	9
55,4–68,4	<b>134</b>	4
68,4–89,5	84	7
89,5–107,0	<b>139</b>	6
107,0–140,3	33	10
140,3–144,5	<b>192</b>	2
144,5–161,2	67	6

Можно предположить, что богатые ниобием, цирконом и монацитом прослой характеризуют области размыва весьма зрелых древних (вероятно, архейских) кор выветривания, сформировавшихся на изверженных кислых породах.

### Заключение

1. Тантал-ниобиевая минерализация в породах федотовской свиты верхнего рифея контролируется многими факторами, имеющими существенное значение для познания закономерностей формирования черносланцевых формаций.

2. В определенных типах пород (метариолиты, гранит-порфиры) и прослоях углеродистых сланцев федотовской свиты наблюдаются повышенные концентрации тантало-ниобиевых минералов. Непосредственно в сланцах они сопровождаются редкоземельными (монацит, ксенотим и др.) и титанциркониевыми (рутил, ильменит, лейкоксен, циркон) минералами. Все эти минералы весьма устойчивы к агентам химического выветривания и могут концентрироваться в корях выветривания.

3. В результате интенсивного размыва рифейских пород в ходе эрозии герцинского горного сооружения на Урале в палеозойские и мезозойские отложения Приуралья должно было поступить значительное количество тантал-ниобиевых минералов. В частности, они были обнаружены в среднеюрских базальных конгломератах Вятско-Камской впадины одновременно с золотом, платиноидами и мелкими алмазами (Осовецкий, 2010, 2013). При их перемыве в современном аллювии концентрации россыпеоб-

разующих минералов существенно возрастают, что позволяет рассматривать их как комплексные россыпепроявления, освоение которых возможно в будущем.

4. Закономерности распределения тантало-ниобиевых минералов в черных сланцах федотовской свиты дают важную информацию об особенностях стадии седиментогенеза в позднерифейскую эпоху и источниках питания обломочного материала. Ритмичное чередование прослоев с повышенными концентрациями тантало-ниобатов в рифейских черных сланцах – результат сортировки минеральных зерен по гидравлической крупности на морском побережье.

### Библиографический список

- Аблизин Б.Д., Ключина М.Л., Курбацкая Ф.А., Курбацкий А.М. Верхний рифей и венд западного склона Среднего Урала. М.: Наука, 1982. 140 с.
- Арифуров Ч.Х., Плугин Д.В., Черноярков В.Г. и др. Золоторудные месторождения «черносланцевого» типа на Южном Урале и закономерности их размещения // Отечественная геология. 2006. № 1. С. 13–22.
- Бадьянова И.В., Суслов С.Б., Осовецкий Б.М. Типы минерализации кор выветривания черносланцевых толщ Горнозаводского района Пермского края // Осадочные комплексы Урала и прилегающих регионов и их минерагения. Уникальные литологические объекты через призму их разнообразия. Екатеринбург, 2016. С. 88–90.
- Баранников А.Г. Золотоносность Гогинского рудно-россыпного района (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. горного университета, 2006. 197 с.
- Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Нестерова С.И., Неустроева И.И. Новые платинопалладиевые проявления дайкового пояса на западном склоне Урала // Ежегодник-2005 / ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2006. С. 340–347.
- Голубева И.И., Терентьева Е.И., Майорова Т.П., Исаенко С.И. Вещественный состав рифейских черных сланцев Среднего Тимана // Региональная геология и металлогения. 2018. № 75. С. 79–89.
- Гурская Л.И. Платинометалльное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования / ВСЕГЕИ. СПб, 2000. 208 с.
- Додин Д.А., Золоев К.К., Коротеев В.А., Чернышов Н.М. Углеродсодержащие формации – новый крупный источник платиновых металлов XXI века. М.: ООО «Геоинформмарк», 2007. 130 с.

Золов К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А. и др. Платинометалльное оруденение в геологических комплексах Урала / ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2001. 199 с.

Курбацкая Ф.А. О строении и развитии зоны сочленения Западного Урала и Восточно-Европейской платформы в позднем докембрии // Докембрийские вулканогенно-осадочные комплексы Урала. Свердловск, 1986. С. 50–59.

Мазеин Д.В., Наумов В.А., Петухов С.Н., Смирнов А.А., Суслов С.Б. Перспективы выявления месторождений золота и платины в черносланцевых толщах Пермского края // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении/ Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. Вып. 13. С. 228–233.

Маслов А.В. Рифейские углеродистые отложения Башкирского мегантиклинория // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 3. С. 101–109.

Маслов А.В., Петров Г.А., Гареев Э.З. Низкоуглеродистые черные сланцы Южного и некоторых районов Среднего и Северного Урала: новые данные по геохимической характеристике // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16, № 1. С. 48–60. DOI 10.17072/psu.geol.16.1.48

Осовецкий Б.М. Редкоземельная и тантало-ниобиевая минерализация в мезокайнозойских отложениях Вятско-Камской впадины // Литосфера. 2010. № 2. С. 64–76.

Осовецкий Б.М. Россыпеобразующие минералы Вятско-Камской впадины / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. 250 с.

Петров Г.А. Прогнозирование благороднометалльного оруденения в допалеозойских черносланцевых толщах центральной части Уральско-го подвижного пояса // Литосфера. 2014. № 6. С. 88–101.

Петров Г.А., Александров В.В., Зубков А.И., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. К проблеме рудоносности черных сланцев Вишерско-Кутимского антиклинория (Северный Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. Вып. 4 (29). С. 32–43. DOI: 10.17072/psu.geol.29.32

Сазонов А.В., Коротеев В.А., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я. Золото в черных сланцах Урала // Литосфера. 2011. № 4. С. 70–92.

Сначёв А.В., Сначёв В.И., Рыкус М.В., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Ардисламов Ф.Р. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Южного Урала. Уфа: ДизайнПресс, 2012. 208 с.

Суслов С.Б. Вулканы федотовской свиты в разрезах по р. Койва // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении/ Перм. гос. ун-т. Пермь, 2018. С. 131–144.

Юдович Я.Э., Кэтрис М.П., Мерц А.В. Геохимия и рудогенез золота в черных сланцах. Сыктывкар: Геонаука, 1990. 61 с.

Юдович Я.Э., Кэтрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 303 с.

## Tantal-Niobium Minerals of the Upper Riphean Fedotovskaya Suite (the Middle Urals)

**B.M. Osovetsky<sup>a</sup>, S.B. Suslov<sup>b</sup>, I.V. Badyanova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Perm State University

15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: opal@psu.ru, kataev7@psu.ru

<sup>b</sup>JSC Geocard-Perm

29 Geologov Str., Perm 614065, Russia. E-mail: geokarta.perm@yandex.ru

The petrographic peculiarities of the Fedotovskaya Suite of the Upper Riphean in the western slope of the Middle Urals are considered. The mineral varieties of tantal-niobium components (ilmenorutile, tantalorutile, ytrocolumbite, polycrase) and geochemical regularities in distribution of niobium concentrations in well sections are described. The connection of Nb high concentrations with metariolite and metabasalt layers is established. The rhythmical distribution of Nb along the carbon-serisite-quartz schist section with alternation of high and low concentrations is discovered. The results of study may be used for solution of theoretical problems of the black shales formation, as well as for designing the prospecting work on complex placers.

Key words: *Fedotovskaya Suite, black shales, tantal-niobium minerals, the Middle Urals, petrography, mineralogy, geochemistry, electron microscopy, X-ray fluorescence analysis.*

## References

- Ablizin B.D., Klyuzhina M.L., Kurbatskaya F.A., Kurbatskiy A.M.* 1982. Verkhniy rifei i vend zapadnogo sklona Srednego Urala [The Upper Riphean and Vendian of the western slope of the Middle Urals]. Moskva, Nauka, p. 140. (in Russian)
- Arifulov C.H., Plugin D.V., Chernoyarov V.G. et al.* 2006. Zolotorudnye mestorozhdeniya «chernoslantsevogo» tipa na Yuzhnom Urale i zakonmernosti ikh razmeshcheniya [Gold deposits of black shale type in the Southern Urals and the laws of their location]. Otechestvennaya geologiya. 1:13–22. (in Russian)
- Badyanova I.V., Suslov S.B., Osovetskiy B.M.* 2016. Tipy mineralizatsii kor vyvetrivaniya chernoslantsevyykh tolshch Gornozavodskogo rayona Permskogo kraya [The minerization types of the black shales weathered crust in Gornozavodsk area of Perm Region]. In: Osadochnye komplekсы Urala i prilozhashchikh regionov i ikh minerageniya. Unikalnye litologicheskie obyekty cherez prizmu ikh raznoobraziya. Yekaterinburg, pp. 88–90. (in Russian)
- Barannikov A.G.* 2006. Zolotonosnost Goginskogo rudno-rossypnogo rayona (Yuzhnyy Ural) [Gold mineralization of Goginskiy ore-placer area (the Southern Urals)]. Yekaterinburg. Izd-vo Ural. gos. gorn. univ., p. 197. (in Russian)
- Golubeva I.I., Terenteva E.I., Mayorova T.P., Isaenko S.I.* 2018. Veshchestvennyy sostav rifeyskikh chyornykh slantsev Srednego Timana [The substantial composition of the Riphean black shales of the Middle Timan]. In: Regionalnaya geologiya i metallogeniya. 75:79–89. (in Russian)
- Gurskaya L.I.* 2000. Platinometalnoe orudnenie chernoslantsevogo tipa i kriterii ego prognozirovaniya [Platinum metals of black shale mineralization type and criteria of their prognosis]. Saint Petersburg, VSEGEI, p. 208. (in Russian)
- Dodin D.A., Zoloev K.K., Koroteev V.A., Chernyshov N.M.* 2007. Uglerodsoderzhashchie formatsii – novyy krupnyy istochnik platinovykh metallov XXI veka [Carbon-bearing formations as a new large source of platinum metals in XXI century]. Moskva, Geoinformmark, p. 130. (in Russian)
- Kurbatskaya F.A.* 1986. O stroenii i razvitiy zony sochleneniya Zapadnogo Urala i Vostochno-Evropeiskoi platform v pozdnem dokembrii [On the structure and development of the zone of the Western Urals and East-European Platform juncture in the Late Precambrian]. In: Dokembriyskie vulkanogenno-osadochnye komplekсы Urala. Sverdlovsk, pp. 50–59. (in Russian)
- Maslov A.V.* 1988. Rifeyskie uglerodistyе otlozheniya Bashkirskogo meganticlinoriya [The Riphean carbonic deposits of Bashkirian meganticlinorium]. Litologiya i poleznye iskopaemye, 3:101–109. (in Russian)
- Maslov A.V., Petrov G.A., Gareev A.Z.* 2017. Nizkouglerodistyе chyornye slantsy Yuzhnogo i nekotorykh rayonov Srednego i Severnogo Urala: novye dannye po geochimicheskoy kharakteristike [Low-carbon black shales of the South and some regions of the Middle and the North Urals: new geochemistry data]. Vestnik Perm University, Geologiya. 16(1):48–60. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.16.1.48
- Mazein D.V., Naumov V.A., Petukhov S.N., Smirnov A.A., Suslov S.B.* 2010. Perspektivy vyavleniya mestorozhdeniy zolota i platiny v chernoslantsevyykh tolshchakh Permskogo kraya [Perspectives of discovering of gold and platinum deposits in black shales of Perm Region]. In: Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm, Perm univ., 13:228–233. (in Russian)
- Osovetskiy B.M.* 2010. Regkozemelnaya i tantal-niobievaya mineralizatsiya v mezokaynozoysskikh otlozheniyakh Vyatsko-Kamskoy vpadiny [Rare-earth and tantal-niobium mineralization in Mesozoic-Cenozoic deposits of the Vyatka-Kama Depression]. Litosfera, 2:64–76. (in Russian)
- Osovetskiy B.M.* 2011. Rossyepobrazuyushchie mineraly Vyatsko-Kamskoy vpadiny [Placer-forming minerals of the Vyatka-Kama Depression]. Perm, Perm Univ., p. 250. (in Russian)
- Petrov G.A.* 2014. Prognozirovaniye blagorodnometalnogo orudneniya v dopaleozoiskikh chernoslantsevyykh tolshchakh tsentralnoy chasti Uralskogo podvizhnogo poyasa [Prognosis of noble-metal mineralization in pre-Paleozoic black shales of the central part of the Ural spreading zone]. Litosfera, 6:88–101. (in Russian)
- Petrov G.A., Aleksandrov V.V., Zubkov A.I., Maslov A.V., Ronkin Y.L.* 2015. K probleme rudonosnosti chernykh slantsev Vishersko-Kutimskogo anticlinoriya (Severnyi Ural) [To the problem of black shales mineralization in the Vishera-Kutimskiy anticlinorium]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 4(29):32–43. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.29.32
- Sazonov A.V., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Y.A., Velikanov A.Y.* 2011. Zoloto v chernykh slantsakh Urala [Gold in black shales of the Urals]. Litosfera, 4:70–92. (in Russian)
- Snachyov A.V., Snachyov V.I., Rykus M.V., Savelyev D.E., Bazhin E.A., Ardislamov F.R.* 2012. Geologiya, petrogeokhimiya i rudonosnost uglerodistykh otlozheniy Yuzhnogo Urala [Geology,

petrogeochemistry and mineralization of carbonaceous deposits of the South Urals]. Ufa, DizaynPress, p. 208. (in Russian)

*Suslov S.B.* 2018. Vulkanity fedotovskoy svity v razrezakh po r. Koyva [Volcanites of Fedotovskaya Suite in the sections on the Koiva River]. *In: Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii*. Perm. Perm. state univ., pp. 131–144. (in Russian)

*Volchenko Y.A., Koroteev V.A., Nesterova S.I., Neustroeva I.I.* 2006. Novye platino-palladievye proyavleniya daykovogo poyasa na zapadnom sklone Urala [New platinum-palladium occurrences of dyke belt in the Western Urals]. *In: Ezhegodnik – 2005*. Ekatherineburg, IGG UrO RAN, pp. 340–347 (in Russian)

*Yudovich Y.A., Ketris M.P., Merts A.V.* 1990. Geokhimiya i rudogenez zolota v chernykh slantsakh [Geochemistry and ore-genesis of gold in black shales]. Syktyvkar, Geonauka, p. 61. (in Russian)

*Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* 1994. Elementy-primesi v chernykh slantsakh [Black Shale Impurity Elements]. Yekaterinburg. UIF Nauka, p. 303. (in Russian)

*Zoloev K.K., Volchenko Y.A., Koroteev V.A. et al.* 2001. Platinometalnoe orudnenie v geologicheskikh kompleksakh Urala [Platinum metal mineralization in geological complexes of the Urals]. Ekatherineburg, IGG UrO RAN, p. 199. (in Russian)