

УДК 553.2

Р.Г. Ибламинов

Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь

ИСТОЧНИКИ И ОСАДИТЕЛИ ХРОМА НА ПЕРМСКИХ РАВНИНАХ

Рассмотрены источники хрома в составе гипербазитов Урала и его осадители на Пермских равнинах в поздней перми в виде волконскоита.

Ключевые слова: хромитинелиды, Урал, геохимия, среда миграции и осаждения, литогенный волконскоит.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2026.79

Источники хрома, мигрирующего в составе водных растворов по Предуральским равнинам в конце пермской эпохи весьма разнообразны. Прежде всего, это ультраосновные магматические горные породы (рис. 1), в которых среднее содержание хрома (0,3 %) превышает кларковое для земной коры ($3,5 \times 10^{-3}$ %) (Ярошевский, 1990, 2010) в 86 раз. Поэтому мы называем хром *гипербазитофильным элементом* (Ибламинов, 2021).

Хром в Периодической системе находится в побочной подгруппе VI группы вместе с молибденом и вольфрамом, что указывает на его шестивалентность. В горизонтальной строке 4-го периода он входит в состав семейства железа.

Атом хрома на наружном 4-м слое имеет 1 электрон, а на втором снаружи 3-м слое 5 электронов: $3d^5 4s^1$. Наличие одного электрона на

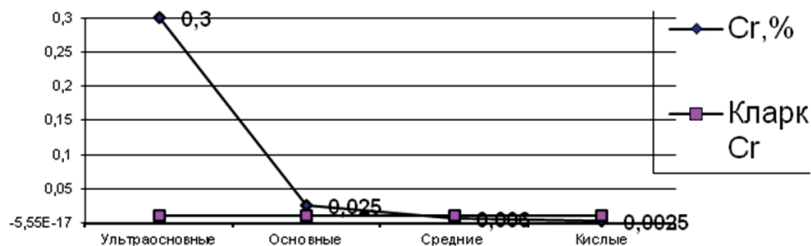


Рис. 1. Распределение средних содержаний хрома по отрядам магматических горных пород, мас. %

внешнем слое отличает хром от остальных элементов семейства железа, у которых на внешнем слое присутствуют по два s-электрона. Благодаря этому его максимальная валентность может быть равна VI, но он чаще имеет валентность III и редко в сильно восстановительных условиях II. По характеру заполнения электронной оболочки хром принадлежит к *d*-элементам и тем самым к семейству железа, с химическими элементами которого он часто образует геохимические ассоциации.

По величине радиусов ионы хрома (нм) уменьшаются с увеличением валентности Cr^{2+} (0,083), Cr^{3+} (0,064), Cr^{6+} (0,035). Радиус наиболее распространённого в природе иона Cr^{3+} сходен с радиусами ионов Fe^{3+} (0,067), Mn^{3+} (0,070), Co^{3+} (0,064) и практически одинаков радиусу иона Al^{3+} (0,067). Это кристаллохимически благоприятствует совместному нахождению названных элементов в составе хромовой шпинели. Радиус Cr^{6+} близок радиусу Si^{4+} (0,039) и P^{5+} (0,035).

В магматическом процессе в первичном базальте, выплавившемся из пиrolита (по А Рингвуду – пироксен-оливиновая порода), содержание хрома на порядок ниже, чем в гипербазитах. При дифференциации базальтовой магмы хром рассеивается, его содержание в средних породах уменьшается ещё на порядок и в кислых становится минимальным. Таким образом, в магматическом процессе хром концентрируется только в деплетированном пиrolите, т.е. в гипербазитах, где его содержание в 1,2 раза выше, чем в мантии.

В платформенных рифтовых обстановках в процессе дифференциации мантийного материала хром накапливается в наиболее высокотемпературных дифференциатах среди дунитов, гарцбургитов и ортопироксенитов – пород гарцбургит-ортопироксенит-норитовой формации. Формируются стратифицированные плутоны гипербазитов с пластообразными телами хромовых руд.

В Уральской складчатой системе ранние концентрации хрома возникли в Протоуральской мегазоне в условиях рифтово-интраокеанического тектонического режима в позднем протерозое Кваркушко-Каменногорской структурно-формационной зоны (Ибламинов, 2023). Они связаны с Сарановским габбро-анортозит-дунит-гарцбургитовым комплексом вышеназванной формации. Сформировался достаточно мощный расслоенный комплекс, который позже подвергся интенсивным дислокациям. В настоящее время он занимает площадь примерно 100×40 км (рис. 2).

В зону гипергенеза комплекс вместе с хромшпинелидами был введен в раннем венде. Обломки хромититов найдены в породах танинской (вильвинской) свиты раннего венда С.Б. Сусловым. В это время

господствовала механическая миграция материала в условиях прибрежно-континентальной терригенной тиллитовидной формации эмерсивно-трансгрессивной обстановки при ледовом типе литогенеза. Мощность терригенной формации в настоящее время составляет 560 м.

Позже в *магматическом процессе* участвовала Палеоуральская мегазона первоначально в условиях спрединговой обстановки Уральского палеоокеана в начале каледонского цикла. В результате плавления океанической коры хром накапливался в высокотемпературном остатке (рестите). Из реститового расплава формировались альпинотипные гипербазиты, в состав которых входили подформные тела хромшпинелидов, размер которых определялся размерами тел гипербазитов (Ибламинов, 2024).

Гипергенными признаками размыва гипербазитов в ордовике служат аномальные содержания хрома в фаунистически охарактеризованных известковистых песчаниках хапхарской свиты нижнего-среднего ордовика (O_{1-2}). Известковистые песчаники содержат реликты разрушающихся хромшпинелидов и фуксит – хромсодержащий мусковит (определения И.Б. Попова). Описанные породы располагаются в Центрально-Уральской зоне Северного Урала в долине р. Мойва. Они принадлежат базальной терригенно-вулканогенной формации, мощность которой достигает 350 м. Породы формировались в трансгрессивной обстановке в условиях гумидного вулканогенного типа литогенеза.

Аналогичные аномалии хрома в ордовикских породах тельпоской свиты (аналоге хапхарской) описаны севернее на Полярном Урале.

Магматический процесс хромообразования продолжился во время девонского спрединга, который происходил на Восточном Урале, и по своей интенсивности превосходил ордовикский. К нему добавился задуговой островодужный спрединг, протекавший в период каменноугольной субдукции.

Таким образом, можно предполагать, что в пределах Уральской системы гипербазиты вместе с рудными телами, как возможные источники экзогенного хрома, формировались первоначально в рифтогенной обстановке протерозоя, затем в спрединговых обстановках ордовика и девона и задуговых – карбона. В условиях коллизии особенно в сутурных зонах они подвергались эрозии и разрушались. Их современное положение иллюстрирует рис. 3.

Палеозойское осадконакопление на Западном Урале, начавшееся в ордовике, прерывалось в девоне и нижнем карбоне. На континенте в будущем Предуралье в палеозое седиментогенез начался с конца нижнего девона и происходил преимущественно в морских условиях,

прерываясь визейским угленакоплением. В конце пермского времени в связи с коллизией окончательно закрывается Уральский палеоокеан. Формируется суперконтинент Пангея (рис. 4). Территория Прикамья оказывается в аридной зоне (между 20 и 40° с.ш.).

В результате территория Пермского края оказалась самой засушливой, расположенной в области распространения аридных красноцветов, гипсов, солей и палеотемператур, оцениваемых в 20–26° (Scotese, 2018). Создались физико-химические условия для водной миграции и осаждения химических элементов, трудно мигрирующих в других обстановках. Их особенность заключалась в сильной обводненности и соответственно залесённости территории (Халезов, 2019).

Последовательно вверх по разрезу и в направлении с востока от Урала на запад на Русскую плиту формируются следующие осадочные формации и связанные с ними концентрации элементов.

1. Кунгурско-соликамская галогенная формация с накоплением карбонатов Ca, Mg, сульфатов Ca, хлоридов Na, K, Mg, Rb.

2. Шешминско-казанская лагунно-континентальная формация, в

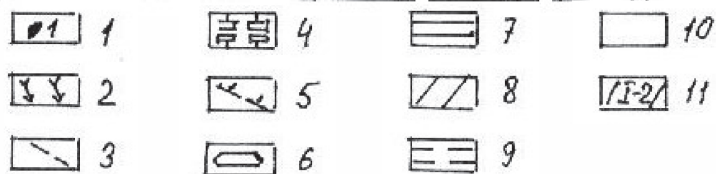
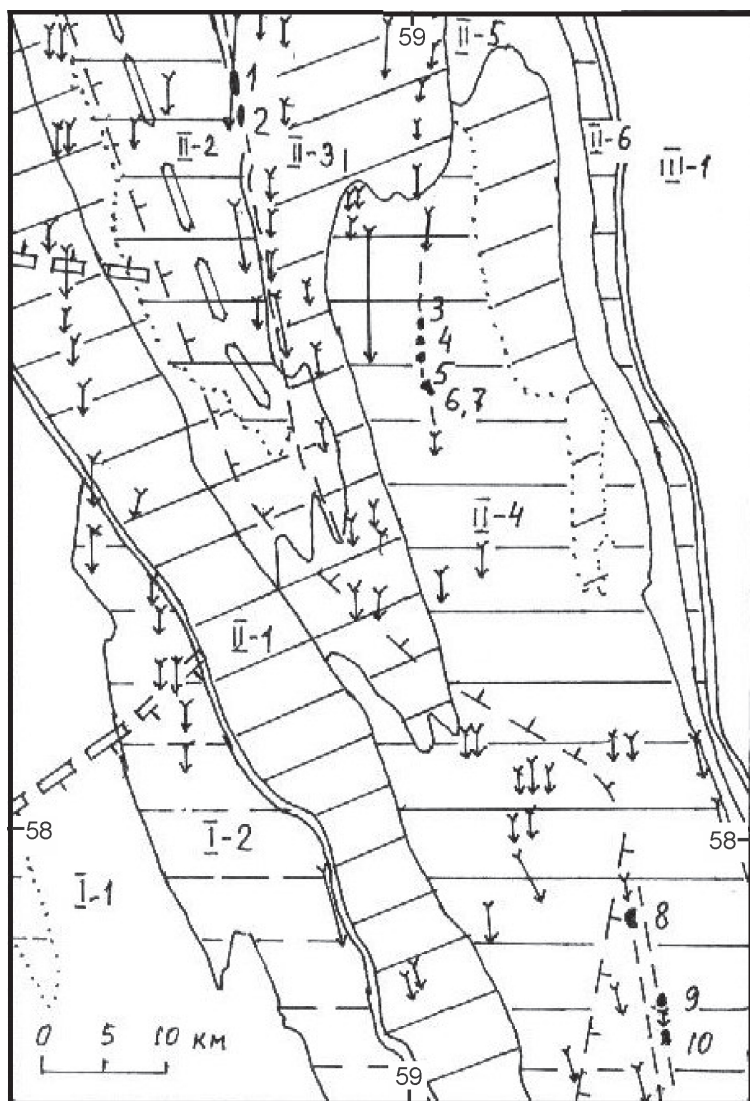
Рис. 2. Геологическое положение тел Сарановского магматического комплекса (Ибламинов, 2002) (составлено автором по материалам Ю.А. Будрина, В.А. Цыганкова, А.М. Зильбермана, Г.О. Пунтусовой, Ф.А. Курбацкой).

Тела магматических комплексов: 1 – Сарановского (1 – Северное Сарановское, 2 – Южное Сарановское; 3, 4, 5 – Кырминские; 6, 7 – Воронковские; 8 – Клыктянское; 9, 10 – Ашкинские), 2 – Усьвинского; 3 – разломы, контролирующие положение тел Сарановского комплекса.

Структуры фундамента по данным геофизики: 4 – границы субширотного зеленокаменного пояса архейской гранит-зеленокаменной области, 5 – западная граница опущенного и переработанного блока фундамента Русской плиты, 6 – осевая зона рифейско-вендского палеорифта, фиксирующаяся в фундаменте и чехле линейным распространением пород с повышенной магнитной восприимчивостью, а в чехле – с повышенной плотностью.

Геологические формации осадочного чехла: 7 – рифейские грабенные, 8 – верхне-рифейско-нижневендская рифтовая спармагмитовая, 9 – верхневендская синеклизная флишидно-молассоидная, 10 – палеозойские.

II – структуры осадочного чехла и их номера. I – Западно-Уральская внешняя зона складчатости, её Кизеловско-Дружининская структура с I-1 – Староуткинской структурой и I-2 – Сыльвицко-Сулемским моноклинорием; II – Центрально-Уральское поднятие: Кваркушско-Каменногорский мегантиклинорий (его структуры: II-1 – Вильвинско-Шишимский моноклинорий, II-2 – Кваркушско-Басегский антиклинорий, II-3 – Усьвинско-Серебрянский седловидный синклинорий, II-4 – Каменногорский антиклинорий); Уловско-Висимский мегасинклинорий (II-5 – Висимский синклинорий); Ляпинско-Кутицкий мегантиклинорий, Верхнепечорско-Кутицкий антиклинорий (II-6 – Колпаковский блок); III – Тагильско-Магнитогорский прогиб, Тагильский мегасинклинорий (III-1 – Лозьвинско-Ревдинская моноклиналь)





которой накопились водный ванадат Cu и V (фольбортит $\text{Cu}_3[\text{VO}_4]_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), а также сульфиды меди.

3. Татарская континентальная пестроцветная карбонатно-терригенная формация с концентрацией хрома в виде хромового монтмориллонита (волконскоита) и западнее – урана в составе настурана, коффинита и других минералов.

В результате в направлении с востока на запад от Предуралья к Русской плите возникла геохимическая зональность: Ca , Mg , Na , K , $\text{Rb} \rightarrow \text{Cu}$, $\text{V} \rightarrow \text{Cr} \rightarrow \text{U}$. Если первая ассоциация образовалась в результате седиментогенеза, то последующие являются инфильтрационными, связанными с

Рис. 3. Схема гипербазитовых поясов Урала (по Л.Д. Булыкину из Овчинников, 1998).

Альпинотипные пояса:

- 1 – Харбейский,
- 2 – Вишерский,
- 4 – Нязепетровский.
- 5 – Зилаирский,
- 6 – Главный Уральский
- 6ж – Кемпирсайский,
- 7 – Узункырский,
- 8 – Серовско-Невьянский,
- 9 – Миасско-Кацбахский,
- 10 – Салдинско-Свердловский,
- 11 – Асбестовско-Режевский,
- 12 – Алапаевско-Челябинский,
- 13 – Айдырлинско-Татищевский,
- 14 – Анихово-Бородиновский,
- 15 – Аккаргинско-Джетыгаринский,
- 16 – Притобольский,
- 17 – Шевченковско-Жетыкульский,
- 18 – Ольгинский.

Стратифицированный пояс:

- 3 – Сарановский

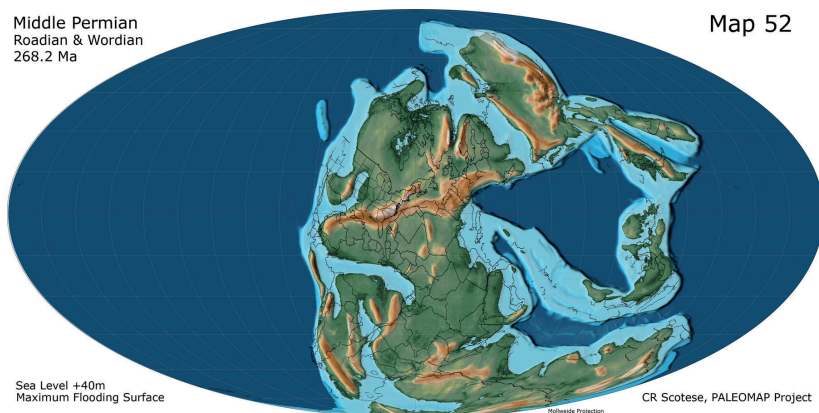


Рис. 4. Палеотектоническая реконструкция для средней перми около 268,2 млн лет назад (Scotese, 2018)

миграций химических элементов в растворённом состоянии и осадчением на геохимических барьерах.

В описанных выше палеоклиматических условиях господствовала окислительная щелочная среда, которая характерна для позднепермских ландшафтов степей и пустынь. Приобретают максимальную валентность и образуют с кислородом комплексные анионы следующие химические элементы: $[V^{5+}O_4]^{3-}$, $[Cr^{6+}O_4]^{2-}$, $[Se^{6+}O_4]^{2-}$, $[Mo^{6+}O_4]^{2-}$, $[U^{6+}O_4]^{2-}$, а также медь с переменной валентностью. Перечисленные комплексные анионы мигрируют в окислительной обстановке и осаждаются либо вступая в реакцию с элементами-осадителями (как фольбортит) либо в восстановительной обстановке, которую обычно создают растительные организмы (как сульфиды меди).

Широко известны концентрации названных элементов в США на плато Колорадо, где они образуют месторождения, именуемые *карнотит-роскозитовыми песчаниками*. Там рудные тела залегают в красно- и сероцветных косослоистых песчаниках формации Моррисон (юра) и Чайнл (триас), содержащих остатки растений и кости пресмыкающихся. Оруденение встречено по всему разрезу пород палеозоя, мезозоя, палеоген-неогена и приурочено к органическим остаткам. Так, два окаменелых ствола деревьев (р-н р. Сан-Мигуэль), один из них размером 30х1,2 м, дали 105 т руды, содержащей на 175 000 долл. радия, 27 300 долл. урана и на 28 200 долл. ванадия (Бэтман, 1949). Ч.Ф. Парк и Р.А. Мак-Дормид (1966) отмечают аномальные содержания в рудах селена, хрома и молибдена. В рудах присутствуют фольбортит и зелёный глинистый минерал.

Подробное описание и исследование уникального хромистого монтмориллонита, названного волконскоитом, ведутся на кафедре минералогии и петрографии Пермского госуниверситета с предвоенных времен (Александров и др. 1941; Енцов и др., 1952; Чайковский, Симакова, 2009). Последние описания приведены в работе А.Б. Халезова (2019).

Все они указывают на приуроченность волконскоита к аллювиальным песчаным толщам верхнепермских отложений, зажатым среди глинистых пород (ваппов) и содержащих стволы деревьев (рис. 5, 6)

В описанных объектах волконскоит образует биоморфозы по остаткам древесины (рис. 7).

Волконскоит ($\text{Mg}_{0,5}\text{Cr}^{3+}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), образующий биоморфозы по древесине, сопровождается минералогическими ореолами кальцита, реже окремнения, которые можно считать предминерализационными, и гидроксидами железа ржаво-бурого цвета («ржавца»), которые являются постминерализационными образованиями. По приведённым данным в конечном счёте получается следующая схема минералообразования: древесина → карбонатизация → волконскоитовая минерализация → накопление оксида железа III.

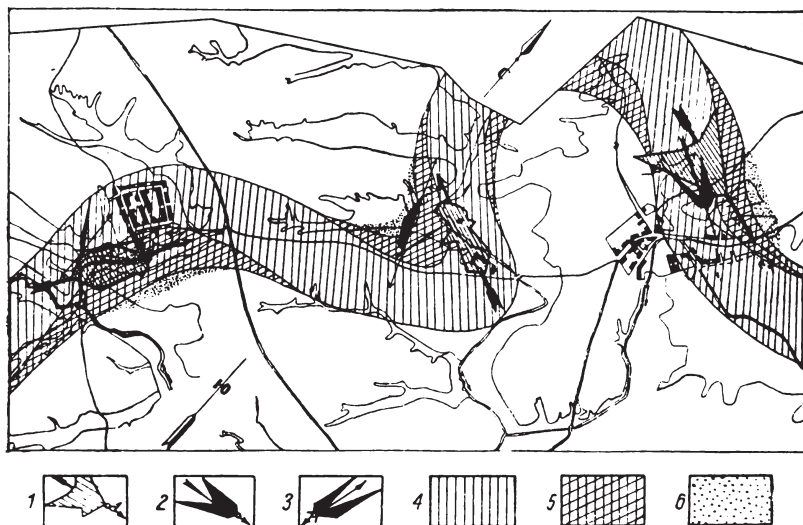


Рис. 5.: Положение залежей волконскоита в речной сети: 1 – розы наклонов плоских галек и направления течения потоков; 2 – розы наклонов волконскоитовых тел и направления течения потоков; 3 – розы ориентировки волконскоитовых тел; 4 – русловая зона потока; 5 – участки, обогащенные волконскоитом; 6 – аргиллит (каменистая глина – «вапп») (Енцов и др. 1952)

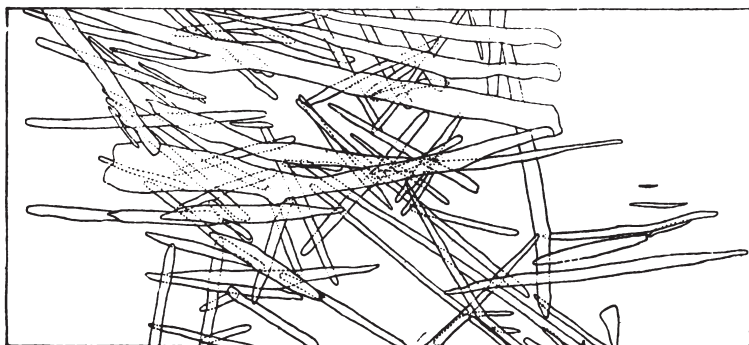


Рис. 6.: Проекция на горизонтальную плоскость тел волконскоита в карьере № 2 горы Пахомовой, пройденном в широтном направлении. Уменьшено в 150 раз (Енцов и др. 1952)

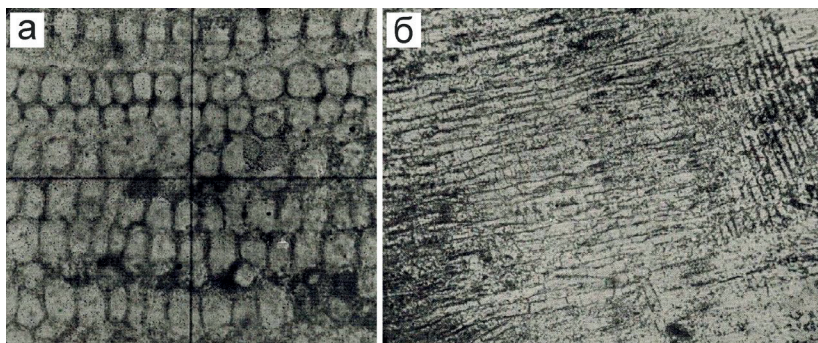


Рис. 7.: Микрофотографии «известковой палочки» с остатками древесины *Dadoxylon viatscheslavi* Zal. Ник. ||: а – поперечный разрез, увел 350; б – продольный разрез осевой части волконскоитового тела, увел. 105 (Енцов и др. 1952)

С геохимической точки зрения карбонатизацию обеспечивает щелочная среда по реакции: $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^{1-} + \text{OH}^{1-} \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O}$.

В щелочной среде приобретают подвижность кремнезём и глинозём (рис. 8).

В щелочной окислительной среде приобретает подвижность ион шестивалентного хрома, например в виде $\text{Ca}^{2+} + [\text{Cr}^{6+}\text{O}_4]^{2-}$.

В конечном счете, создаётся окислительная щелочная среда с усилением щёлочности за счёт карбонатизации, благоприятная для водной миграции всех компонентов, необходимых для создания волконскоита (Al, Si, Cr). Как только водная фаза попадает в остатки древесины среда с окислительной меняется на восстановительную.

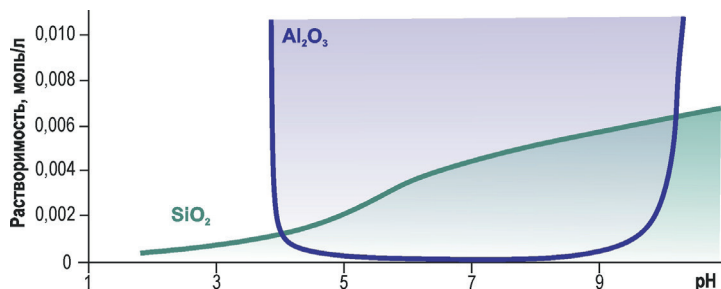


Рис. 8. Растворимость кремнезёма и глинозёма как функция pH (Тугаринов, 1973)

В восстановительной среде хром из шестивалентного восстанавливается до трёхвалентного, который вместе с названными элементами выпадает в осадок. В этой же восстановительной среде присутствующее железо становится двухвалентным, легко подвижным и выносятся за пределы среды реакции и, попадая в окислительную среду, выпадает в виде оксида или гидроксида в осадок в виде «ржавца».

Таким образом возникает новый тип литогенных месторождений хромового монтмориллонита – волконскоита.

Библиографический список

- Александров В.В., Игнатьев Н.А., Кобяк Г.Г. Волконскоит Прикамья // Учен. зап. Перм. ун-та. 1941. Т. IV, вып. 3. 77 с.
- Бэтман А.М. Промышленные минеральные месторождения / пер. с англ. под ред. В.М. Крейтера. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 648 с.
- Грин Д.Х., Рингвуд А.Э. Происхождение базальтовых магм // Петрология верхней мантии. М.: Мир, 1968. С 132–227.
- Енцов Г.И., Игнатьев Н.А. и Старков Н.П. К геолого-петрографической характеристике волконскоитовых месторождений Прикамья // Записки Всесоюзного минералогического общества. Серия 2, часть 81, вып 3. 1952. С. 179 – 184.
- Ибламинов Р.Г. Геологическая история Сарановского месторождения хромовых руд – отражение истории развития региона // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. статей / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2002. С. 229–247.
- Ибламинов Р.Г. Минерогенная зональность и фильтрационных руд в породах пермской системы на восточной окраине Русской плиты // Пермская система: стратиграфия, палеонтология, палеогеография, геодинамика и минеральные ресурсы: сб. матер. Междунар. науч. конф. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. С. 255–258.
- Ибламинов Р.Г. Геология месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2019. 232 с.
- Ибламинов Р.Г. Петрологическая классификация химических элементов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. статей / отв. ред. И.И. Чайковский; Перм. гос. нац. исслед. ун-т; Горный ин-т УрО РАН. Пермь, 2021. Вып. 24. С. 79 – 87..
- Ибламинов Р.Г. Геология и полезные ископаемые Пермского края: учеб. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2023. 138 с.

- Ибламинов Р.Г. Геолого-промышленные типы месторождений. Тип хромшпинелиевый в альпинотипных гипербазитах // Вестник Пермского университета. Геология. С. 301 – 321. 2024 DOI: 10.17072/psu.geol.23.3.301.
- Короновский Н.В. , Хашин В.Е. , Ясаманов Н.А. Историческая геология: учебник. М. Изд. центр «Академия», 2008. 464 с.
- Парк Ч.Ф., Мак-Дормид Р.А. Рудные месторождения. М.: Мир, 1966. 545 с.
- Тугаринов А.И. Общая геохимия: краткий курс / учебное пособие. М.: Атомиздат, 1973. 288 с.
- Халезов А.Б. Уран и медь верхнепермской красноцветной формации Предуралья (парагенетические связи) // Минеральное сырьё № 37. М.: ВИМС, 2019. 142 с.
- Чайковский И.И., Симакова Ю.С. Чагинская группа месторождений (местонахождения уникального минерала – волконскоита) // Геологические памятники Пермского края: энциклопедия. Пермь: Книжная площадь, 2009. С. 329 – 334.
- Ярошевский А.А. Кларки химических элементов верхней части континентальной коры (гранитно-метаморфической оболочки). Средние содержания (г/т) химических элементов в главных типах магматических пород // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / А.П. Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. М.: Недра, 1990. С. 12–13.
- Ярошевский А.А. Геохимия земной коры // Российская геологическая энциклопедия: в трёх томах. Т. I. М.; СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. С. 374–375.
- Paleogeographic Maps, maps 43 - 48 from Volume 3 of the PALEOMAP Atlas for ArcGIS (Jurassic and Triassic) and maps 49 – 52 from Volume 4 of the PALEOMAP PaleoAtlas for ArcGIS (Late Paleozoic), Mollweide Projection, PALEOMAP Project, Evanston, IL

SOURCES AND SETTLERS OF CHROME IN THE PERM PLAINSHIPS

R.G. Iblaminov

*Perm State National Research University, Perm
riaminov@psu.ru*

The sources of chromium in the hyperbasites of the Urals and its settlers in the Permian plains in the Late Permian in the form of volkonskoite are considered.

Keywords: chromium spinelides, Urals, geochemistry, migration and sedimentation environment, lithogenic volkonskoite.