
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 553.481

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/86-103>

Поступила в редакцию: 14.05.2024

Принята к публикации: 20.05.2024

Опубликована онлайн: 28.06.2024

Минерагения кор выветривания. Сообщение первое: руды железа, алюминия, марганца

©2024 А. Д. Савко[✉], М. Ю. Овчинникова

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российской Федерации*

Аннотация

Введение: В корах выветривания (КВ) сосредоточены практически все запасы бокситов и каолинов, порядка 80 % силикатного никеля, около 50 % богатых железных руд (БЖР) и марганца от общих разведанных. Также накапливаются Au, REE, U, Ti, Zr, фосфориты и другие виды минерального сырья. Необходимым условием аккумуляций минерального сырья является наличие полезного компонента и формы его нахождения в материнской породе. В ней содержание различных элементов может колебаться от сотых долей (REE) до 20 и более (Fe) процентов.

Виды полезных ископаемых КВ рассмотрены во многих публикациях, в том числе авторов статьи. Вместе с тем приуроченность полезных ископаемых к КВ различных климатических зон, связи аккумуляций с определенными типами рельефа в пределах каждой из них во многом остались неосвещенными. Не уделялось особого внимания распределению полезных компонентов по профилю КВ, т.е. к каким зонам профиля выветривания тяготеет тот или иной вид минерального сырья. Этим нерешенным вопросам и посвящена настоящая статья. Она является первым из трех сообщений, посвященных минерагении Fe, Al, Mn. Во втором будут другие металлы (Ni, Co, Au, REE и др.), третьем – неметаллы (каолины, фосфориты, цеолиты и др.).

Методика: При подготовке статьи авторы опирались на собственные данные по изучению ряда полезных ископаемых КВ (бокситы, каолины, БЖР, кремнистое сырьё, цеолиты). Использовались формационный, фациальный, палеогеографический, сравнительно-литологический методы их изучения, а также стадиальный анализ, основанные на детальном изучении вещественного состава пород КВ. Применение стадиального анализа связано с формированием рассматриваемых руд в различных зонах профиля выветривания. Учитывался и тектонический фактор, действующий через рельеф. Принимались во внимание эпигенетические процессы, ответственные за обогащение либо обеднение выветрелых пород полезным компонентом.

Результаты и обсуждение: Первые аккумуляции БЖР появились в середине девона. Поначалу их средняя мощность составляла не более 10 м в площадных и до 20–30 м в линейных корах. В карбоне и мезозое мощности площадных КВ составляли первые десятки метров, линейных – первые сотни метров, а в кайнозое – 50–60 и до 300 и более соответственно. Но при этом могло быть наложение молодых КВ на более древние. Так на КМА доказаны иллит-каолинитовые КВ девона, а возможно и более ранние, по которым развит элювий, сложенный полуторными окислами. Формирование повышенных концентраций железа начинается уже в зоне начального разложения, а наибольшее его количество образуется в зоне конечного разложения (полуторных окислов) и кирасе. При этом большое значение имеет нарастающее со временем влияние органики, что повлияло на увеличении



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Савко Аркадий Дмитриевич: savko@geol.vsu.ru

разведанных запасов БЖР, которых в кайнозое больше, чем за все предыдущие времена. Бокситы известны с раннего палеозоя. Они карстового типа, развиты в карбонатных толщах, немногочисленны и пока не представляют промышленного интереса. В среднем девоне в связи с выходом растворительности на сушу и влиянием биоса на процессы выветривания, выразившиеся в увеличение их интенсивности, появились первые месторождения высококачественных бокситов в КВ на карбонатных породах, в заметных количествах, содержащих алюмосиликатный компонент (мергели, прослои глин и вулканогенного материала). В карбоне интенсивность выветривания и спектр материнских пород расширились. Возник сублатеритный тип бокситов, отличающийся от типичного латеритного наличием полного профиля выветривания с 4-мя зонами, в котором бокситы приурочены к его самой верхней части. В мезозое накопление глинозема тяготеет к подвижным поясам, где преобладает карстовый тип высококачественных бокситов. На докембрийских и молодых платформах процессы выветривания алюмосиликатных пород приводили к формированию преимущественно каолинов. Кайнозой – основная эра, когда образовалось абсолютное большинство месторождений и основные запасы бокситов Мира. Основной их тип – латериты, в подвижных поясах продолжали формироваться скарновые месторождения. Формирование марганцевых руд в КВ связано с активной биогеохимической активностью элемента, большей его подвижности по сравнению с железом и алюминием и сменами валентности. Это в одних случаях приводило к его выносу из пород профиля выветривания, в других – к концентрациям. Такое поведение Mn способствовало при небольшом кларке (0.95) давать аккумуляции в десятки процентов. В раннем палеозое они карстового типа, определены abiогенными процессами, позднее влияние органики на процессы выветривания стало одним из главных факторов, и месторождения Mn стали формироваться не только на карбонатных, но и силикатных породах с повышенным содержанием этого элемента.

Заключение: Формирование полезных ископаемых происходит на разных стадиях образования КВ. Для железа оно начинается в зоне начального и достигает максимума в зоне конечного разложения. Глинозем, входящий в состав бокситов, аккумулируется только в самой верхней зоне полуторных окислов профиля выветривания. Пик аккумуляции марганца приходится на зону промежуточного разложения, где его руды содержат включения каолинитовых глин.

Ключевые слова: Кора выветривания, богатые железные руды, бокситы, марганец.

Для цитирования: Савко А. Д., Овчинникова М. Ю. Минерагения кор выветривания. Сообщение первое: руды железа, алюминия, марганца // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 2. С. 86–103. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/86–103>

Введение

В настоящее время коры выветривания (КВ) определяют как «комплекс горных пород, образовавшихся в континентальных субаэральных условиях в результате физического и химического изменения горных пород верхней части литосферы под воздействием климатических, геолого-структурных, геоморфологических и биохимических факторов» [1]. КВ, обладающая нередко значительной мощностью, обычно повсюду характеризуется четко выраженным зональным строением, поскольку она представляет собой метасоматическое образование, возникшее в зоне гипергенеза в результате взаимодействия просачивающихся растворов с вмещающими их горными породами. Важнейшую роль при этом играет органическое вещество, резко ускоряющее разложение материнского субстрата.

Выветривание, наряду с процессами осадконакопления, метаморфизма, магматизма, играет важную роль в дифференциации и рециклинга минерального вещества. В КВ происходит наиболее масштабная при гипергенезе его дифференциация под воздействием атмосферы, гидросферы и органического мира. При этом могут формироваться многие полезные ископаемые. В КВ сосредоточены практически все запасы

бокситов и каолинов, порядка 80 % силикатного никеля, около 50 % богатых железных руд и марганца от общих разведенных. В КВ накапливаются марганец, никель и кобальт, REE, золото, фосфориты и другие, менее известные виды минерального сырья. Необходимым условием образования аккумуляций полезного ископаемого является наличие его компонента в материнской породе. В ней содержание Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Mn_2O_3 при формировании БЖР, бокситов и марганцевых руд соответственно может достигать 25–33, 12–30 и 10–15 %, для других металлов доли, реже первые проценты.

Виды полезных ископаемых КВ рассмотрены в публикациях многих авторов, но наиболее полные сводки по ним приведены в работах [1, 2]. Вместе с тем приуроченность полезных ископаемых к КВ различных климатических зон, связи аккумуляций с определенными типами рельефа в пределах каждой из них во многом остались неосвещенными. Не уделялось особого внимания распределению полезных компонентов по профилю КВ, т.е. к каким зонам профиля выветривания тяготеет тот или иной вид минерального сырья. Этим нерешенным вопросам и посвящена настоящая статья.

Методика исследований и фактический материал

При подготовке статьи авторы опирались на собственные данные по изучению ряда полезных ископаемых КВ (бокситы, каолины, БЖР, кремнистое сырьё, цеолиты). Использовались формационный, фациальный, палеогеографический, сравнительно-литологический методы их изучения, а также стадиальный анализ, основанные на детальном изучении вещественного состава пород КВ. Применение стадиального анализа связано с формированием рассматриваемых руд в различных зонах профиля выветривания. Учитывался и тектонический фактор, действующий через рельеф. Принимались во внимание эпигенетические процессы, ответственные за обогащение либо обеднение выветрелых пород полезным компонентом.

В основу фактического материала для настоящей статьи положены данные из трехтомника «Историческая минерагения» [3] и более поздней работы «Рудные месторождения России и Мира» [4]. В этих работах приводятся сведения о более 5000 значимых месторождений полезных ископаемых, в том числе из КВ. В них рассмотрены распространение рудных скоплений и их генетические типы. Это дало основание для суждения о минерагении КВ в истории Земли. По возможности использовались и другие литературные источники, содержащие сведения по месторождениям КВ.

Результаты исследований и их обсуждение

В зависимости от климатических условий, тектонических режимов, положения в рельефе, состава материнского пород, представленных магматическими, метаморфическими и осадочными образованиями, элювий на них может существенно различаться по типу зональности, мощностям, минерально-петрографическим особенностям, типу полезного ископаемого. Наиболее проработанными являются КВ в областях теплого гумидного тропического и субтропического климатов, где их мощности достигают десятков, а в местах тектонических нарушений и сотен метров. Конечными химическими образованиями такого выветривания являются полуторные окислы.

КВ, обладающие нередко значительной мощностью, обычно характеризуются зональным строением, поскольку они представляет собой метасоматические образования, возникшие в зоне гипергенеза в результате взаимодействия просачивающихся растворов с вмещающими их горными породами. Важнейшую роль при этом играет органическое вещество, резко ускоряющее разложение материнского субстрата.

Под зоной коры выветривания понимается ее часть в вертикальном разрезе с определенным минеральным составом, физическими свойствами и структурно-текстурными особенностями и характеризующаяся определенным комплексом происходящих или происходивших в ней геохимических процессов. Переход одной зоны в другую может быть плавный, постепенный или резкий. Реакционная зональность элювия образуется вследствие постепенного выноса одних элементов

и накопления других. Остающиеся на месте элементы под влиянием постоянно изменяющихся pH и Eh среды преобразуются и формируют минералогическую зональность, которая во многом определяется составом исходных пород. На алюмосиликатных породах устанавливается четыре зоны (табл. 1).

На других типах пород (железистых, карбонатных, кремнистых, глинистых, марганцевых) выделение подобной зональности крайне затруднено либо из-за отсутствия характеризующих её индикаторных минералов, либо их наличия в материнских породах как, например, в глинах.

В зоне дезинтеграции преобладают процессы физического разрушения пород, в результате чего они растрескиваются и дезинтегрируются. По трещинам и расколам проникает атмосферная вода, насыщенная кислородом и углекислотой. Одновременно здесь происходят процессы окисления, гидролиза и растворения, которые охватывают прилегающие к трещинам участки породы и постепенно преобразуют их. По физическим свойствам породы первой зоны элювия еще слабо отличаются от материнских, хотя содержат уже 10–20 % новообразованных глинистых и других минералов.

Зона начального разложения характеризуется тем, что в ней все алюмосиликатные и другие минералы, способные разлагаться, уже замещены новообразованными глинистыми и другими минералами. Однако вынос подвижных элементов здесь еще не завершен, а вновь образованные минералы часто характеризуются непостоянством состава и продолжают изменяться. При выветривании пород кремнезем силикатов и алюмосиликатов легко переходит в растворы и выносится из пород, а в элювии в соответствии с его оставшимся количеством могут образоваться смектиты или другие минералы. Физические свойства пород существенно изменяются. Они становятся рыхлыми и пористыми, но еще полностью сохраняют текстуру и структуру материнской породы. Все алюмосиликатные минералы здесь уже замещены новообразованными, а окраска породы зависит от цвета преобладающих новых минералов и, в первую очередь, от количества гидрооксидов железа. В этой зоне почти без изменения остаются только инертный кварц и большая часть акцессорных минералов. Последние изредка встречаются в нижней части второй зоны, а в средней и верхней ее частях они отсутствуют.

В зоне промежуточного разложения наиболее распространены каолинит, кварц и оксиды железа. В зависимости от состава материнских пород количественные соотношения названных минералов и реликтового кварца различны. Породы третьей зоны элювия, также как и нижележащие, сохраняют текстуру и структуру материнских пород, почти всегда обладают высокой пористостью. Породы этой зоны, как и зоны начального разложения, являются основными поставщиками материала для терригенных отложений (кварцевых песков и алевритов, полиминеральных глин) из источников сноса.

Табл. 1. Схема зональности кор выветривания алюмосиликатных и других типов пород, а также приуроченности к ним полезных ископаемых
[Table 1.] Scheme of zonation of weathering crusts of aluminosilicate and other types of rocks, as well as the occurrence of minerals in them]

Зона КВ [Weathering crust zone]	Минералогические признаки зон [Mineralogical characteristics of the zones]	Типы полезных ископаемых [Types of minerals]
IV – конечного разложения (полуторных окислов): конечного гидролиза: [IV – final decomposition (one and a half oxides): secondary hydrolysis]	Оксиды Al, Fe, Mn (глибсит, бемит, гетит, гидрохематит и др.) [Oxides of Al, Fe, Mn (gibbsite, boehmite, goethite, hydrohematite, etc.)]	Бокситы, БЖР («краски»), Ni и Co в оксидах железа, Mn, Au, REE, алмазы [Bauxite, BZHR ("paints"), Ni and Co in iron oxides, Mn, Au, REE, diamonds]
III – промежуточного разложения (каолинитовая): начального гидролиза, конечных выщелачивания, гидратации [III – intermediate decomposition (kaolinite): initial hydrolysis, secondary leaching, hydration]	Каолинит, кварц, реликты иллита и др. алюмосиликатов, гетит, гидрохематит, гидрогематит, бертиерин [Kaolinite, quartz, relics of ilite and other aluminosilicates, goethite, hydrohematite, hydrogoethite, hydrohematite, bertierine]	Каолины, гидрогетитовые, гетитовые, гидрохематитовые БЖР («краски»), Ni и Co в оксидах железа, Mn, Au, REE, фосфориты, маршаллит, алмазы, Ti, Zr [Kaolins, hydrogoethite, hetic, hydrohematite BZHR ("paints"), Ni and Co in the oxides of the same, Mn, Au, REE, phosphorites, marshallite, diamonds, Ti, Zr]
II – начального разложения (иллит-смектитовая): окисления, гидратации, и выщелачивания [II – initial decomposition (illite-smectite): oxidation, hydration, and leaching]	Иллит, смектит, мартит, кварц, бертиерин, хлорит, редкие остаточные минералы материнских пород [Illite, smectite, martite, quartz, bertierine, chlorite, rare residual minerals of parent rocks]	Мартитовые («синьки») БЖР, вермикулит, Ni и Co в нонtronитах; маршаллит, Au, алмазы, барит, цеолиты, кремнистое сырье [Martite ("blue") BZHR, vermiculite, Ni and Co in non-ferrous metals; marshallite, Au, diamonds, granite, zeolites, siliceous raw materials]
I – дезинтеграции (освещленных материнских пород): растрескивания окисления, просачивания начальной гидратации и выщелачивания [I – disintegration (of the illuminated parent rocks): cracking of oxidation, seepage of initial hydration and leaching]	Иллит, карбонаты минералы материнских пород, окисленные пирит, магнетит и биотит [Illite, carbonates, minerals of parent rocks, oxidized pyrite, magnetite and biotite]	Магнезит, Ni и Co в выщелоченных серпентинитах [Magnesite, Ni and Co in leached serpentinites]
Материнские породы [Mother breeds]	Минералы силикатных, карбонатных и других пород, содержащих полезные компоненты [Minerals of silicate, carbonate and other rocks containing useful components]	латеритный тип КВ.

В зоне конечного разложения реликтовые структуры и текстуры материнских пород сохраняются редко. От третьей зоны к четвертой постепенно уменьшается количество каолинита и увеличивается содержание глибсита. Глибсит вместе с гидрооксидами железа образует скопления мелких конкреций, обусловливающих появление бобовой и оолитовой текстур. Появляются тонкие прожилки глибсита, которые вместе с конкрециями цементируют элювий, придавая ему каменистый облик. Объемный вес таких пород значительно увеличивается, а реликтовая структура сохраняется лишь в отдельных участках.

Породы зоны всегда сложены оксидами и гидрооксидами железа, алюминия, титана, изредка присутствуют каолинит и иногда кварц, а также эпигенетические образования. Последние особенно широко распространены в верхних зонах элювия, где он вскоре после образования был перекрыт континентальными осадками. Из этих осадков в элювий проникали восстановительные растворы, которые обусловили образование вторичного шамозита, различных карбонатов и изредка пирита. Породы этой зоны почти всегда имеют красно-бурую окраску и образуют так называемый

зарубежной и отечественной литературе используются термины «латерит» и «латеритизация», применяемые исследователями экзогенных продуктов в различных науках о Земле: геологами, почвоведами, геоморфологами, географами и другими специалистами. Латериты занимают большие пространства в странах тропических, обильных атмосферными осадками. Южной и Центральной Америке, Индии, Австралии, Африке и некоторых других. Термин прочно вошёл во многие отрасли науки. На месте первого описания латерита в Индии воздвигли монумент. Впоследствии латериты были обнаружены на многих горных породах всех материков и островов в современном тропическом поясе, а также в ископаемом состоянии среди пород различного возраста как образования палеотропических климатов.

Латериты – продукты интенсивного субаэрального выветривания горных пород. Они состоят из минеральной ассоциации гётита, гематита, гидрооксидов алюминия, каолинитовых минералов и кварца. Термин «латерит» приобрёл яркий генетический оттенок и к латеритам относят не только продукты интенсивного вывет-

ривания алюмосиликатных пород, но и силикатных (железо-кобальт-никелевые руды), и карбонатных – карбонатитов (железо-марганцевые охры с REE), тем более, что последние находятся в теснейшей ассоциации с латеритизированными алюмосиликатными породами.

В стандартном латеритном профиле ниже латерита выделяют зоны литомаржа или структурную выветрелую породу. Сапролит состоит из слоистых алюмосиликатных КВ материнских пород, главным образом, из каолинита (если материнская порода не ультраосновная) плюс кварц, рутил, циркон и др. В нижней части сапролита могут находиться иллит, нонтронит, монтмориллонит и смешанослойные минералы. Таким образом, литомарж объединяет две минеральные зоны КВ – каолинитовую и смектитовую.

Эти термины входят как части в понятие о КВ как о едином целом, но зональном образовании, возникшем в результате воздействия экзогенных факторов. Различные сочетания их хорошо укладываются в представление о преимущественном развитии в КВ трех типов профилей полного, сокращенного и неполного, название которых по минеральному составу снимает неопределенность и дешифрирует понятия латерит, литомарж, сапролит (структурная глина).

Различают полный, сокращенный и неполный профили КВ. В полном профиле развиты все возможные минерально-geoхимические зоны КВ. При «выпадении» одной или двух промежуточных зон, профиль называют сокращенным. При отсутствии одной или

нескольких верхних зон, когда процессы выветривания не доходят до конца, профиль называют *неполным*. Каждый из этих трех типов профилей может подвергнуться эрозии, в результате которой верхние зоны могут быть уничтожены. Такой профиль называется *размытым* и в ряде случаев его трудно отличить от *неполного*.

Богатые железные руды (БЖР). Их месторождения известны с девона. Материнским субстратом для них являются джеспилиты и гипербазиты. В первых железа до 30–33 %, в КВ по ним – до 62–63 %, а во вторых до – 21–25 и 53 % соответственно. В балансе железных руд Мира около триллиона тонн, на БЖР приходится примерно половина. Особую ценность они имеют и потому, что их месторождения комплексные, поскольку материнские породы BIF также являются рудой на железо, добываемое после отработки БЖР. КВ на гипербазитах развиты намного меньше. Они легированные, поскольку в них примеси Mn, Ni, Co и других элементов.

В материнских породах БЖР железо чаще всего находится в двухвалентной форме. При выветривании уже в зоне начального разложения при воздействии кислорода оно переходит в трехвалентное. По магнетиту развивается гематит, давая мартит, придающий породам серовато-синий цвет («синьки»). Выше мартит и железосодержащие силикаты в джеспилитах переходят в гидрогематит и гетит (гидрогетит), придающие породам (рис. 1, 2) бурые и красные цвета.



Рис. 1. Карьер месторождения Хамерсли. Серо-синим цветом окрашены мартитовые руды, буро-красным – гидрогематит-гетитовые [5].

[Fig. 1. A quarry at the Hamersley deposit. Martite ores are highlighted with grey-blue, hydrohematite-goethite ores are highlighted with red-brown [5].]



Рис. 2. БЖР Белгородского месторождения КМА. Слева мартитовая, справа гидрогематитовая руды. Из работы [6].

[Fig. 2. High-grade iron ores of the Belgorodskoye deposit at the Kursk Magnetic Anomaly. Martite ores are on the left, hydrohematite ores are on the right. From [6].]

Процесс перехода 2-х валентного Fe в 3-х валентное происходит с выделением энергии, что интенсифицирует процесс выветривания и приводит к выщелачиванию кварца и уже в зоне начального разложения появляются БЖР «синьки». Им в КВ межрудных сланцев соответствуют смектит-иллитовые образования с примесью минералов материнских пород. В зонах промежуточного (каолинитовой на алюмосиликатных породах) и конечного (полуторных окислов) разложения БЖР представлены красками.

Поэтому в КВ по джеспилитам можно четко выделить две зоны – нижнюю мартитовую и верхнюю гидрогематит-гётитовую. В верхних частях последней в КВ кайнозоя тропических стран обычна «канга» (67 % Fe) – пизолитовая и бобовая руда, состоящая из обломков твердой или мягкой руды, сцементированных лимонитом.

В элювии по ультраосновным породам зональность выражена отчетливо. По данным работы [7], на плато Пинарес-де Маяри территории Кубы КВ внизу представлена породами зоны дезинтегрированных серпентинизированных перидотитов с прожилками окремненного керолита. Выше залегают зеленовато-серые выщелоченные разности гипербазитов (зона начального разложения). Вверх они сменяются зоной структурных охр оранжево-желтых охр (до 10 м), представляющих совмещенные зоны промежуточного и конечного разложения сокращенного профиля. Ещё выше расположена зона темно-красных бесструктурных охр (до 7 м) с железистыми конкрециями (от 1 до 30 мм). На пониженных участках плато между зонами выщелоченных серпентинов и структурных охр появляется нонtronитовая зона (до 5 м) и тогда профиль выветривания становится полным. Её породы темно-зеленого цвета. Появление этой зоны связано с пониженней интенсивностью водообмена при выветривании по сравнению с таковой сокращенного профиля. Структурные и бесструктурные охры сложены преимущественно гематитом, в меньшей степени гематитом.

Но разрез КВ на гипербазитах массива Калум с крупным месторождением БЖР в Гвинее (Западная Африка) заметно отличается. Там по данным работы [8] на невыветрелых дунитах, минуя зоны I и II, залегают легкие, мягкие и сухие структурные железные охры (20–80 м), перекрытые небольшим по мощности (1–2 м) слоем плотных, обычно натечных руд. Венчает разрез кираса мощностью в среднем 5, реже до 10 м. Руды состоят из оксидов железа (гетит, гематит, лимонит, состоящий из гидроокислов железа). Основной примесью является гиббсит, каолинит, смектит, вблизи контакта КВ с материнскими породами, магнетит, оксиды хрома, марганца, титана, кварц. Содержание Fe 40–50 %, постоянно присутствуют Ni, Co, Mn, Cr, т.е. руды в отличие от БЖР на железистых кварцитах являются легированными.

Формирование повышенных концентраций железа при выветривании начинается уже в зоне начального разложения, а наибольшее его количество образуется в зоне конечного разложения (полуторных окислов). При этом большое значение имеет нарастающее со

временем влияние органики, что повлияло на увеличение запасов БЖР, которых в кайнозое больше, чем за все предыдущие времена.

Анализ распределения запасов железа в фанерозое показал, что его накопление происходило в эпохи выравнивания территорий и теплого гумидного климата, интенсивного образования КВ на суше и ослабленного приноса терригенного вещества в морские бассейны [9]. Такие условия были в позднем девоне-раннем карбоне (Восточная Европа), юре и мелу (Урал, Украина, Австралия), кайнозое (страны с тропическим климатом). Особенно масштабной была последняя эпоха, когда накопилась большая часть разведанных БЖР. Во время образования КВ на суше в лагунных и морских бассейнах накапливались оолитовые руды лотаринского типа (Западно-Сибирский, Лотарингский, Керченский и другие железорудные бассейны).

Бокситы. Выделяются их три основных типа: карстовый, сублатеритный, латеритный. Первые бокситы появились в раннем кембрии в единичных участках складчатых поясов при их пенепленизации. Они обнаружены в нескольких точках Сибири, Алтая, Монголии, Восточного Саяна. В настоящее время известно непромышленное Боксонское месторождение низкокачественных железистых диаспор-бемитовых бокситов в Бурятии, в юго-восточном Саяне. Они карстовые, развиты в карбонатных толщах при выветривании брекчированных доломитов. Породообразующими минералами также являются гематит, иллит, каолинит, в небольших количествах имеются пироксен, хлорит, пирофиллит, смектит [10].

В эйфельском веке образовались бокситы высокого качества ряда месторождений на Северном Урале. Они приурочены к складчатой области, выполняют карстовые воронки в органогенных известняках нижнего девона (рис. 3), и имеют мощность от первых до 40 м.

В разрезе бокситоносной толщи отсутствует характерная для КВ вертикальная зональность. В известняковой толще выделяется три горизонта бокситов, отвечающих перерывам в осадконакоплении. Бокситы мощностью от первых до 40 м, в среднем 2–7 м, выполняют карстовые воронки. Выделяются три горизонта – нижний красных марких, средний красных немарких и яшмовидных, а также верхний зелено-серых пестро цветных руд. Красный маркий и немаркий диаспоровые бокситы слагают около 80 % всего рудного пласти, имеют кремневый модуль 10–12 и являются наиболее высокосортными. Основным породообразующим минералом в них является диаспор, минералов железа (гематита, гетита) порядка 20 %, в небольших количествах содержатся бемит и хлорит, в незначительных – кварц, кальцит. В яшмовидных разностях глинозем входит в состав бемита, в пестро-цветных – диаспора и бемита. Породообразующими также являются оксиды железа. В виде примесей присутствуют карбонаты, хлорит и каолинит. Высокое качество руд определяется их химическим составом. В них (%) 50–60 Al₂O₃; 2–7 SiO₂; 20–25 Fe₂O₃; 2.0–2.5 TiO₂; 12–13 H₂O.

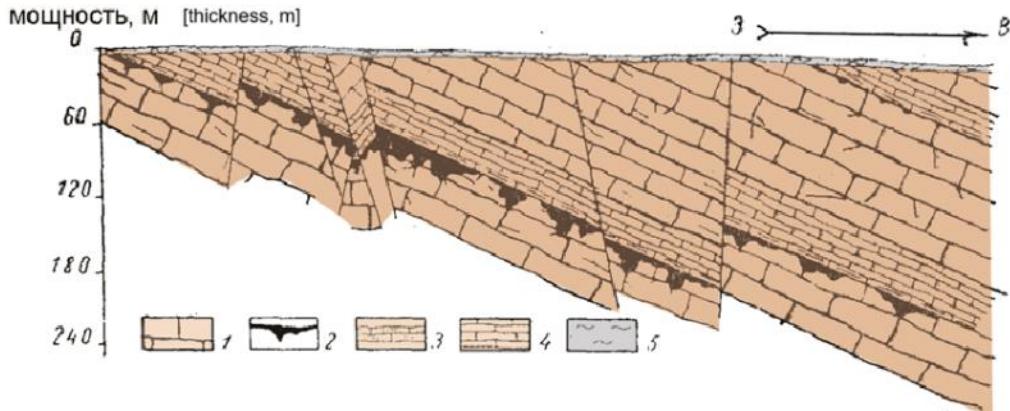


Рис. 3. Разрез месторождения Красная Шапочка (Северный Урал) [11]: 1 – известняки массивные розово-белые (D_2); 2 – бокситы; 3 – мергели, черные аргиллиты; 4 – серые амфиопоровые известняки (D_2); 5 – супеси и суглинки (Q).
[Fig. 3.] The section of the Krasnaya Shapochka deposit (Northern Urals) [11]: (1) – massive pink-white limestones (D_2); (2) – bauxites; (3) – marls, black mudstones; (4) – gray amphiporous limestones (D_2); (5) – sandy loam and loam (Q).]

Таким образом, карстовые бокситы начали формироваться в карбонатных толщах с прослойями эфузивов и глин, содержащих аллюмосиликаты. Это произошло во время континентальных перерывов при пенепленизации и скарнировании горных областей. Растворение карбонатов приводило к созданию высоко щелочных обстановок где, алюминий приобретал подвижность, мог мигрировать и осаждаться в выщелоченных полостях при снижении pH. Поэтому основным способом накопления глиноzemа был хемогенный, поскольку растительность ещё не завоевала сушу. Поэтому доля запасов рассматриваемых бокситов в их

мировых запасах крайне незначительна.

Начиная с позднего девона, когда вышедшая на сушу растительность освоила значительные территории, проявились крупные месторождения бокситов сублатеритного типа с хорошо выраженной зональностью профиля выветривания. Это связано с активным участием органического вещества в биогенно-хемогенном преобразовании материнского субстрата. Типичным примером месторождения бокситов в КВ по рифейским терригенно-карбонатным породам и туфам девона на Среднем Тимане (рис. 4) в пределах эпикаледонской платформы.

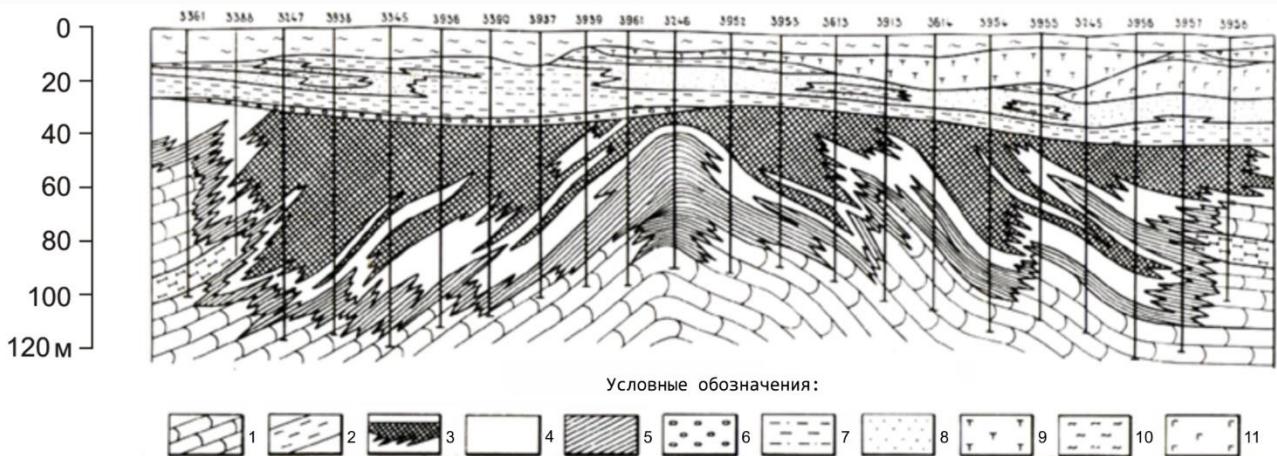


Рис. 4. Геологический разрез по одной из залежей Верхне-Щугорского месторождения (Ворыквинская группа): 1 – полевошпат-карбонатные сланцы; 2 – мергели и известковистые сланцы; 3 – бокситы; 4 – аллиты; 5 – коалинизованные продукты выветривания метасоматитов; 6 – делювиально-пролювиальные бокситы; 7 – глины и алевролиты; 8 – песчаники; 9 – туфы и туффиты; 10 – четвертичные отложения; 11 – субинтрузии основного состава [12].
[Fig. 4.] The geological section across one of the deposits in the Verkhne-Shchugorskoe deposit (Vorykvin group): (1) – feldspar-carbonate shales; (2) – marls and calcareous shales; (3) – bauxite; (4) – allites; (5) – coalized weathering products of metasomatic rocks; (6) – deluvial-proluvial bauxites; (7) – clays and siltstones; (8) – sandstones; (9) – tuffs and tuffites; (10) – Quaternary sediments; (11) – subintrusions of basic composition [12].

Пласт бокситов обычно подстилается аллитами, вниз сменяющимися каолинитовыми глинами, залегающими на слабо выщелоченных известняках. Породы КВ перекрыты базальтами, песчаниками и глинами

франа. Мощность бокситов колеблется от первых до 50, средняя 6–7 м. Наличие легкорастворимых карбонатных слоев в материнском субстрате способствовало усилиению интенсивности выветривания. Главные

минералы бокситов бемит, гематит, бертьерин и каолинит, второстепенные - иллит, смектит, диаспор, шамозит, кварц, акцессории. Наличие такого количества промежуточных минералов свидетельствует о «растянутости» процесса выветривания, что, собственно, отличает сублатеритное выветривание от латеритного. В последнем случае образуется сокращённый профиль, а гиббсит может развиваться прямо по минералам

материнских пород.

В раннем карбоне бокситонакопление происходило на докембрийских платформах Северного полушария, а в их пределах – на периферийных частях угленосных бассейнов [13]. Оно продолжалось в среднем карбоне на Китайской (рис. 5) и Северо-Американской платформах, а на территории Кореи вплоть до ранней перми.

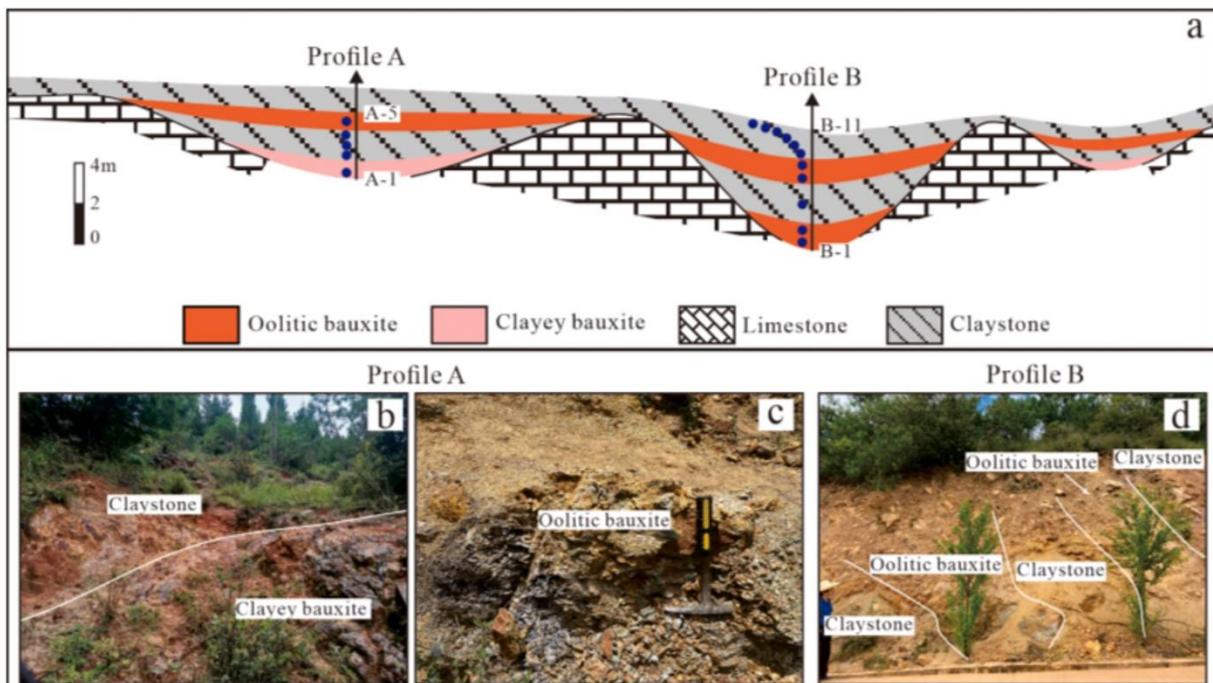


Рис. 5. Фотографии поперечного разреза и обнажений карстового бокситового месторождения Юйси, показывающие состав и места отбора проб рудоносных серий пород. Из работы [14]: (a) – разрез, включая профили А и В данного исследования; (b–c) – фотография обнажения профиля А, на которой показаны глинистые бокситы, аргиллиты и оолитовые бокситы; (d) – обнажение фотография профиля Б, на которой видны оолитовые бокситы и аргиллиты.

[Fig. 5. Photographs of the cross section and outcrops of the Yuxi karst bauxite deposit showing the composition and sampling location of the ore-bearing rock series. From [14]: (a) – cross-section including profiles A and B of this study; (b–c) – photograph of the outcrop of profile A, which shows clayey bauxites, mudstones and oolitic bauxites; (d) – outcrop photograph of profile B, which shows oolitic bauxites and mudstones.]

Спектр материнских пород для бокситоносных КВ значительно расширился. Это сланцы (КМА, рис. 6), карбонатно-глинистые толщи (Тиман, Тихвинский район), базиты и гипербазиты (Северо-Онежский район). Палеозойские бокситы имеют диаспор-бемитовый, бертьерин-бемитовый, бемитовый, реже гиббсит-бемитовый составы. В профиле выветривания хорошо проявлена зональность. Так в работе В.И. Сиротина и Е.Е. Беляевцевой выделяются четыре зоны КВ на протерозойских сланцах и архейских амфиболитах [16]: I – начального разложения (окисления, просачивания, дезинтеграции и начальной гидратации); II – промежуточного разложения (растворения кварца, начальных выщелачивания и гидратации); III – конечного разложения (конечного выщелачивания, гидратации и гидролиза); IV – конечного гидролиза или свободного глинозема).

В трех нижних зонах сохраняется реликтовая текстура материнских пород и только в верхней появляется псевдобобовая текстура. Каждая из зон характе-

ризуется своим минеральным составом. Характерным промежуточным минералом палеозойских бокситов является бертьерин (рис. 7).

Помимо сублатеритного продолжал формироваться и карстовый тип, но в значительно меньших масштабах и только на карбонатных породах, содержащих прослои алюмосиликатных образований. В рассматриваемое время резко возросло число месторождений бокситов (сотни) с их общими запасами до 4 млрд тонн. Месторождения мезозойских бокситов тяготеют к складчатым поясам, а в их пределах – к эпигерцинским и эпикиммерийским платформам Северного полушария. Наибольшее сосредоточение залежей в Средней и Южной Европе. Преобладающий тип бокситов карстовый, развитый по карбонатным породам (рис. 8). В литературе этот тип часто называют терраса. Залежи имеют форму линз, карманов, воронок, реже пластов в карбонатных породах и залегают на разных возрастных уровнях.

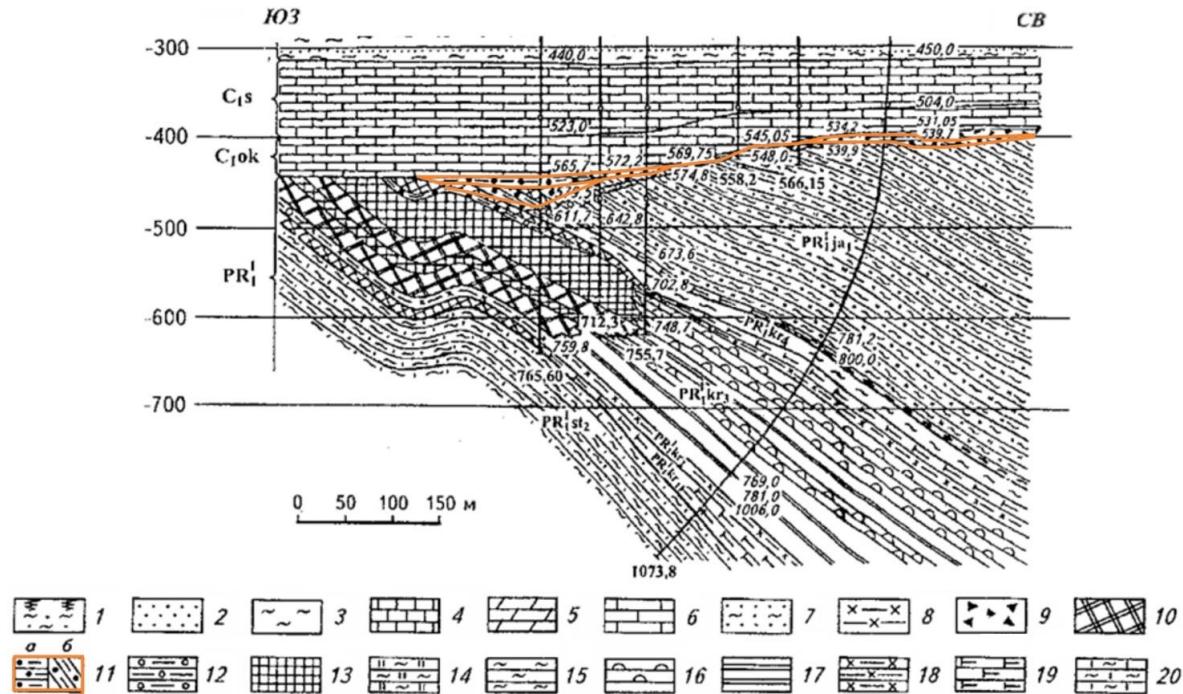


Рис. 6. Схематический геологический разрез по профилю VIII-1840 Висловского месторождения КМА [15]: 1–8 – осадочные породы чехла: 1 – суглинки, 2 – пески, 3 – глины, 4 – мела, 5 – мергели, 6 – известняки, 7 – пески глинистые, 8 – песчаники; 9 – руды переотложенные; 10 – руды мартитовые, железно-слюдково-мартитовые; 11 – бокситы осадочные (а), элювиальные (б); 12 – аллиты, ферроаллиты; 13 – руды мартит-ги-дрогети-тальные и мартит-гидрогематитовые; нижний протерозой – оскольская серия: 14 – яковлевская свита, нижняя подсвита – сланцы углисто-кварц-слюдянные тонкослоистые с прослойками кварцитов и метаконгломератов в основании; курская серия: 15–19 – коробковская свита: 15 – верхняя сланцевая подсвита – углеродистые сланцы, 16–17 – верхняя железорудная подсвита; 16 – кварциты силикатно-магнетитовые и карбонатно-магнетитовые с прослойями межрудных сланцев, малорудных и безрудных кварцитов 17 – кварциты магнетитовые, железнослюдково-магнетитовые, 18 – нижняя сланцевая подсвита – сланцы кварц-хлорит-слюдяные, 19 – нижняя железорудная подсвита – малорудные кварциты; 20 – стойленская свита – сланцы углисто-кварц-слюдянные.

[**Fig. 6.** Schematic geological section along profile VIII-1840 of the Vislovskoye deposit KMA [15]: (1–8) – sedimentary rocks of the cover: (1) – loams, (2) – sands, (3) – clays, (4) – chalk, (5) – marls, (6) – limestones, (7) – clayey sands, (8) – sandstones; (9) – redeposited ores; (10) – martite, iron-mica-martite ores; (11) – sedimentary bauxites (a), eluvial (b); (12) – allites, ferroallites; (13) – martite-hydrohematite and martite-hydrohematite ores; Lower Proterozoic - Oskol series: (14) – Yakovlev formation, lower subformation – thin-layered carbonaceous-quartz-mica shales with interlayers of quartzites and metaconglomerates at the base; Kursk series: (15–19) – Korobkovsky formation: (15) – upper shale subformation – carbonaceous shales, (16–17) – upper iron ore subformation; (16) – silicate-magnetite and carbonate-magnetite quartzites with interlayers of interore shales, low-ore and barren quartzites, (17) – magnetite, iron-mica-magnetite quartzites, (18) – lower shale subformation - quartz-chlorite-mica shales, (19) – lower iron ore subformation – low-ore ny quartzites; (20) – Stoylenkaya suite – carbonaceous-quartz-mica shales.]



Рис. 7. Фото шлифа бертьерин-бемитового боксита с реликтовой микрослоистостью. В светлых слойках bemit, в темных – бертьерин по мусковит-биотитовым прослоям. Видны начальные стадии образования овоидов (псевдобобовин) с реликтами бертьерина в их центре, окружёнными bemitom. Николи II, увеличение 70. Скважина 6, глубина 462 м. КМА, Большетроицкое месторождение. Из работы [16].

[**Fig. 7.** Photo of berthierine-boehmite bauxite thin section with relict microlamination. Light layers are boehmite, dark layers are berthierine over muscovite-biotite interlayers. The photograph clearly shows initial stages of the formation of ovoids (pseudo-peas) with relict berthierine in the centre surrounded by boehmite. Nicols II, magnification 70. Well 6, depth 462 m. Kursk Magnetic Anomaly, Bolshetroitskoye deposit. From [16].]

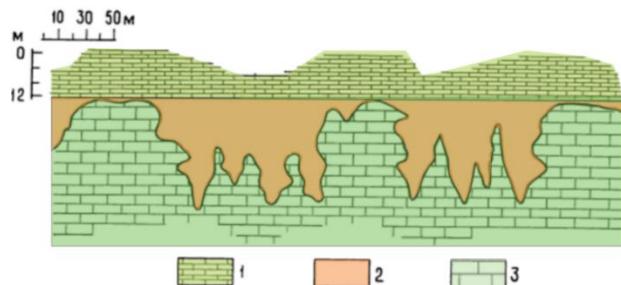


Рис. 8. Сложная воронкообразная залежь, горы Киона, Греция: 1 – известняк, турон и сенон; 2 – боксит; 3 – известняк по-дошви, сеноман [17].

[Fig. 8. Complex funnel-shaped deposit, Giona mountains, Greece: (1) – limestone, Turonian and Se-Nonian; (2) – bauxite; (3) – limestone of the base, Cenomanian [17].]

Их выделяется до восьми, но чаще всего это позднетриасово-раннеюрский и раннемеловой уровни. В карстах бокситы могут подстилаться каолинитовыми глинами, а также маршаллитами.

Бокситы, развитые по алюмосиликатным породам, имеют пластовую или плащевидную формы и относятся к латеритному типу. Так в Индонезии крупное месторождение на о. Бинтан

развито в верхней части КВ по риолитам. Бокситовый пласт мощностью до 7 м залегает на каолинитовых глинах (литомарж).

Бокситы имеют гиббсит-бемитовый у платформенных разновидностей и диаспор-бемитовый составы в подвергшихся складчатости участках. В Средиземноморском подвижном поясе насчитывается более 1000 месторождений бокситов, однако, большинство из них мелкие, хотя качество сырья в них высокое. Общие запасы глинозема мезозойских бокситов (3.3 млрд тонн), несколько меньше палеозойских, хотя число месторождений больше. Это связано с тем, что на докембрийских платформах преобладали низменные обводненные ландшафты и теплый гумидный климат, благоприятные для формирования каолиновых КВ, но не бокситов.

В кайнозое бокситонакопление приняло грандиозные масштабы – до 90 % всех запасов бокситов Мира (чуть больше 100 млрд т). Это связано с расширением площадей выравненной суши, тропическим климатом, относительно высоким стоянием материков, их дроблением и увеличением прибрежных территорий с большим количеством осадков и обилием органики. Всё это привело к образованию мощных латеритных КВ с крупными и суперкрупными месторождениями бокситов. Профиль КВ сокращенный за счет редукции зон начального и промежуточного разложения. Основные запасы бокситов сосредоточены на материалах бывшей Гондваны. Это Австралия, Южная Америка Индия (рис. 9).

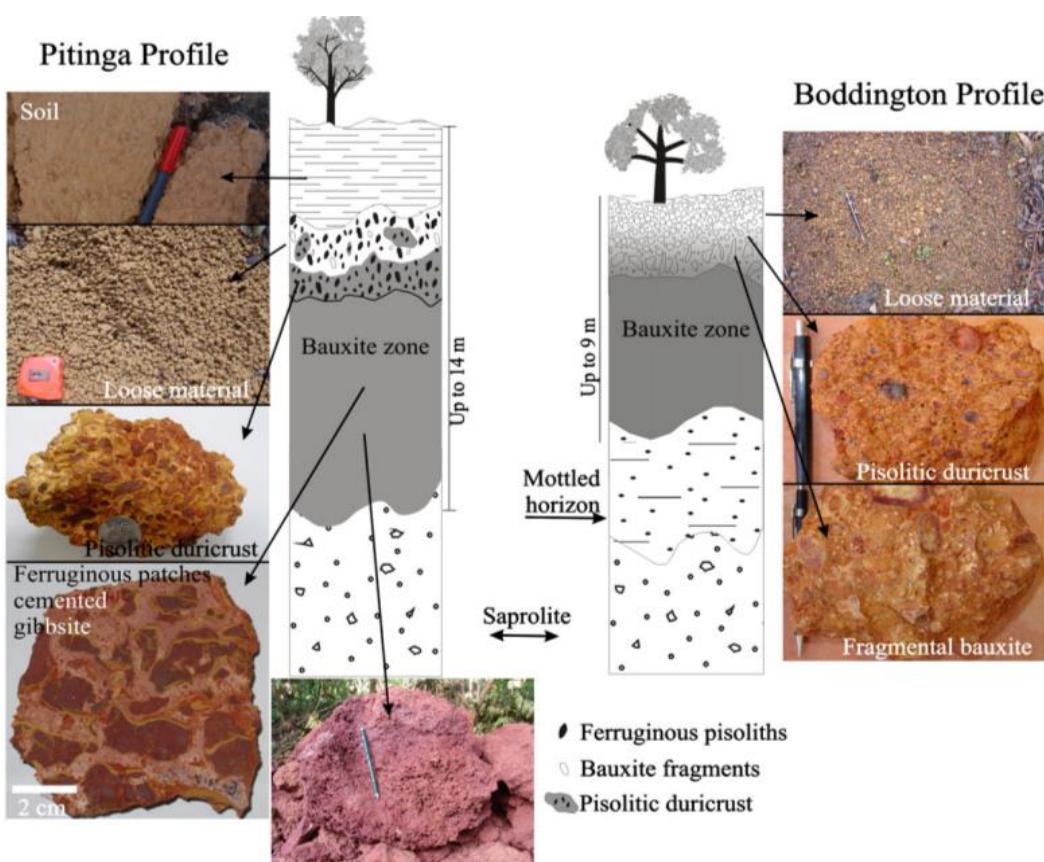


Рис. 9. Реголитовая структура профилей и текстурные детали каждого горизонта Питинга (Бразилия) и Боддингтона (Австралия). Из работы [18].

[Fig. 9. Regolithic profile structure and textural details of each horizon in Piting (Brazil) and Boddington (Australia). From [18].

Наиболее богата бокситами Западная Африка, особенно Гвинея (рис. 10). В ней 16 бокситоносных районов объединены в бокситоносную провинцию плато Фута-Джалон (около 20 млрд т запасов), включающую месторождения Туге, Боке, Сангареди и другие. Залежи Туге прослеживаются на 100 км по боловаям - вершинам столовых гор с отметками +750–900 м и относительными превышениями 200–400 м. Таких боловаях десятки, с общей площадью 1 тыс км². Бурые, пористые гиббситовые бокситы повсеместно развиты по терригенным образованиям R₃, PZ, долеритам MZ. Среднее содержание Al₂O₃ – 40–48%, SiO₂ – 1.3–5%. Запасы только на шести боловаях 1.5 млрд т.

Район Боке (250 км к СЗ от Конакри) имеет площадь 5000 км². Его боловая (5–20 км² каждый) имеют превышения 200–400 м над днищами долин. Латериты на их поверхности имеют мощность до 30 м. Они развиты по терригенным толщам силура и девона, прорывающим дайкам габбро-диабазов и долеритов. Рыхлые псевдоморфные бокситы мощностью 5–10 м залегают над гётит-каолинитовым, с примесью гиббсита, литомаржем. Они перекрыты конгломератом видной кирасой до 10 м мощностью, в верхней части которой Fe₂O₃ до 50 %, а в нижней и собственно бокситах – 26–36 %. Запасы бокситов с Al₂O₃ 55 % около 1 млрд т.

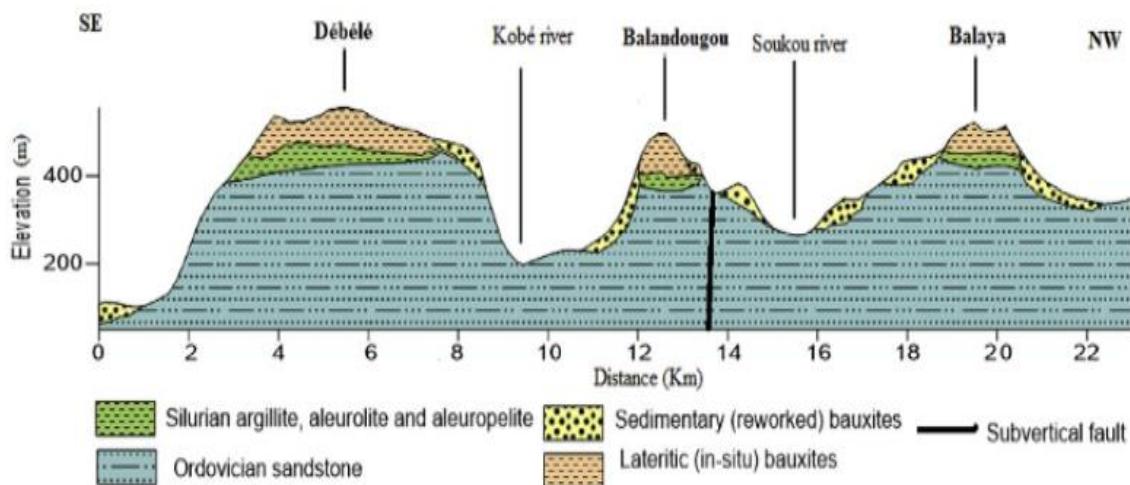


Рис. 10. Бокситовые месторождения Гвинеи, Западная Африка. Из работы [19].
[Fig. 10. Bauxite deposits of Guinea, West Africa. From [19].]

Уникальное мирового значения месторождение Сангареди (2 млрд т.) находится на северо-западе страны [20]. Пласт олигоцен-миоценовых гиббситовых, с примесью бёмита, гётита бокситов средней мощности 15 м содержит 56.5–64.8% Al₂O₃ (значения возрастают с глубиной) и не более 1.3% SiO₂. В работе [20] показано, что верхняя часть разреза представляет бокситы, развитые по континентальным осадочным отложениям. Этими авторами установлено полигенное и полихронное образование высококачественных бокситов общей мощностью до 30 м.

Заметная доля в общих запасах приходится на месторождения островных дуг плащеобразного типа (рис. 11).

Унаследован с мезозоя в тип «терра-роса» на территории Западной Европы. При этом в одном месторождении они могут быть совмещены на разных уровнях, как в пределах горы Киона в Греции.

Таким образом, первые аккумуляции бокситов появились в раннем палеозое. Они кастового типа, развиты в карбонатных толщах, немногочисленны и пока не представляют промышленного интереса. В среднем девоне в связи с выходом растительности на сушу и влиянием биоса процессы выветривания, выразившиеся на увеличение их интенсивности, появились первые месторождения высококачественных бокситов в КВ на карбонатных породах. Последние содержали в заметных количествах алюмоシリкатный компонент (мергели, прослои глин и вулканогенного материала). В карбоне интенсивность выветривания и спектр материнских пород расширились. Возник сублатеритный тип бокситов, отличающийся от типичного латеритного наличием полного профиля выветривания с четырьмя зонами, в котором бокситы тяготеют к его самой верхней части.

В мезозое накопление глинозема тяготеет к под-

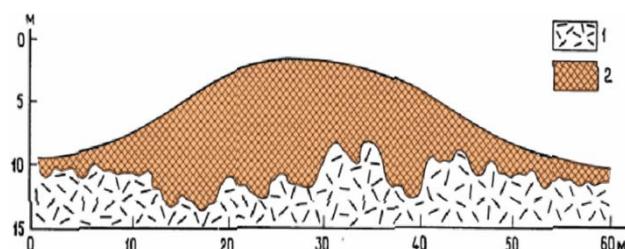


Рис. 11. Геологические разрезы линзообразных бокситовых залежей на плато Манчестер, остров Ямайка: 1 – известняк подошвы; 2 – боксит [17].
[Fig. 11. Geological sections of lens-shaped bauxite deposits on the Manchester Plateau, Jamaica: (1) – limestone base; (2) – bauxite [17].]

вижным поясам, где преобладает карстовый тип высококачественных бокситов. На докембрийских и молодых платформах процессы выветривания алюмосиликатных пород приводили к формированию преимущественно каолинов. Кайнозой – основная эра, когда образовалось абсолютное большинство месторождений и основные запасы бокситов Мира. Основной их тип – латериты, в подвижных поясах продолжали формироваться скарновые месторождения.

Марганец. С КВ Mn-содержащих пород связано порядка половины всех запасов этого металла в Мире, составляющего 21.3 млрд т. Выделяют его оксидные, оксидно-карбонатные и карбонатные типы руд. Наиболее ценным является первый, основные запасы и крупные месторождения которого тяготеют к КВ (рис. 11). В них содержание Mn достигает 55–60 %, среднее – 45–48 %. Исходными материнскими породами для аккумуляций марганца являются содержащие его карбонаты, углеродистые сланцы, гондиты и другие Mn-содержащие

породы, а также бедные этим металлом руды.

Основными генетическими типами являются латеритный, скарновый и скарново-латеритный. Основное значение имеют первые. В них обычно снизу вверх выделяются три зоны: 1 – карбонатных руд (начального разложения), 2 – оксидных руд (промежуточного и конечного разложения), 3 – кираса (конечного разложения). Вместе с тем для руд различных месторождений имеются свои специфические особенности. Они обусловлены составом материнских пород, положением в рельефе КВ, интенсивностью выветривания, связанной с эволюцией органического мира.

В раннем палеозое известно месторождение Бейтсвилл (Арканзас, США). Его первично рдохрозитовые залежи локализованы в углеродистых глинистых сланцах ордовика и силура. В развитой здесь нижнепалеозойской КВ оксиды и гидроксиды Mn выполняют карстовые полости (рис. 12). Мощность залежей до 25 метров при содержании марганца в рудах до 50 %.

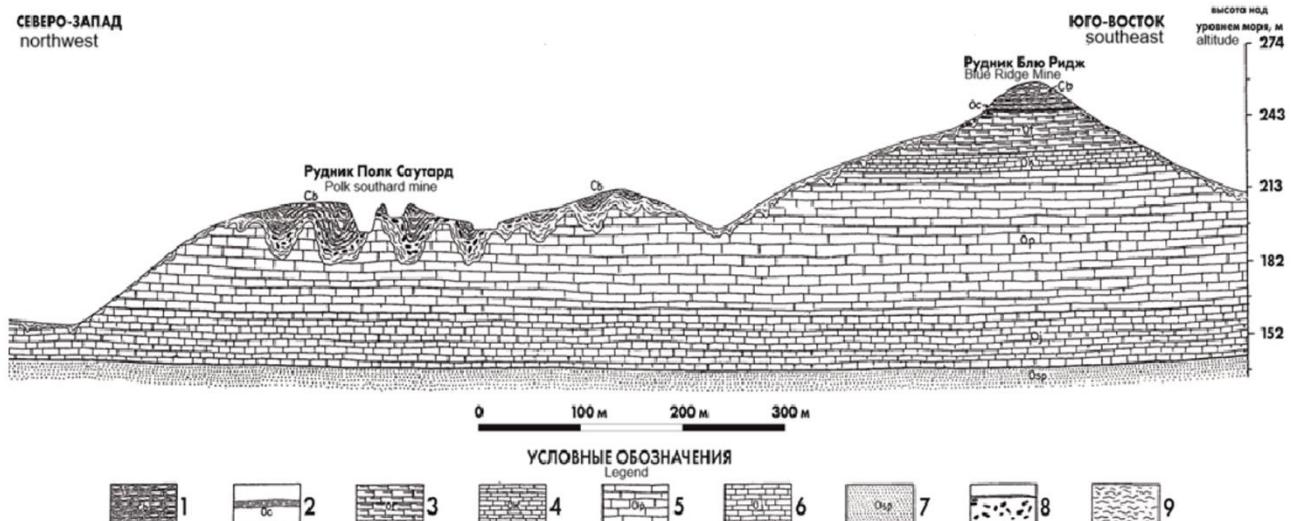


Рис. 12. Геологический разрез месторождения Бейтсвилл (Арканзас, США): 1 – кремни, 2 – сланцы Кейсон, 3 – известняк Фернвейл, 4 – известняк Киммсвик, 5 – известняк Платтин, 6 – известняк Иоахим, 7 – известняк Св. Петра, 8 – руды марганца, 9 – глины КВ. [21].
[Fig. 12.] Geological section of the Batesville deposit (Arkansas, USA): (1) – flints, (2) – Cason shales, (3) – Fernvale limestone, (4) – Kimmwick limestone, (5) – Plattin limestone, (6) – Joachim limestone, (7) – St. Peter's limestone, (8) – manganese ores, (9) – weathering crust clays [21].

Руды марганца в мезозойских КВ известны в Южном Тяньшане. Повышенные концентрации Mn приурочены к КВ кремнисто-терригенно-карбонатных пород (D_3-C_1). Мощность элювия по ним до 200–400 м. Материнские отложения содержат 5–10 % Mn, а в КВ, сложенной пиролюзит-псиломелановыми или вад-псиломелановыми рудами, 21–29 % Mn, 2–12 Fe %.

На территории Австралии имеется месторождение Mn Грут Айландт (рис. 13). Оно является одним из крупнейших в мире (запасы более 200 млн т.); имеет важное экономическое значение не только для Австралии, но играет также большую роль в мировой экономике марганцеворудного сырья. Основная часть марганцевой минерализации приурочена к КВ мергелей нижнего мела, содержащих до 20 % MnO.

Поданным работ [23, 24] пласт оксидов Mn развит,

главным образом, в относительно пониженных участках западных прибрежных равнин и образует почти сплошное рудное тело, протягивающееся в субмеридиональном направлении на 22 км при ширине около 6 км. Оно сложено оолитовыми, рыхлыми пизолитовыми, сцепментированными пизолитовыми, конкреционными, бесструктурными, песчанистыми, кремнистыми, железистыми и вкрашенными рудами с прослойями кремовых и красноватых каолиновых глин, реже кварцевого песка (рис. 14). В основании разреза КВ развиты пизолит-оолитовые руды. Такой состав рудной толщи позволил И. М. Варенцову и Д. И. Головину [23] нижний пизолитовый горизонт отнести к меловой КВ, а залегающие выше породы – к продуктам её размыва и переотложения в олигоцен-миоценовое время с дополнительной их латеритизацией.

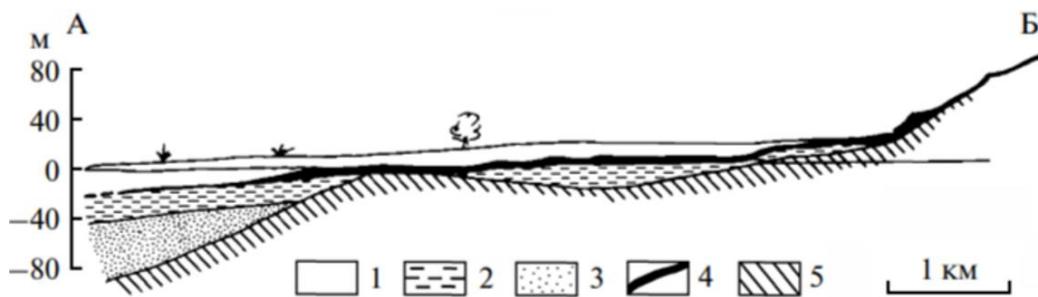


Рис. 13. Геологический разрез месторождения марганцевых руд ГрутАйленд: 1 – пострудные глины, почвы; 2 – марганцевые оксидные руды; 3 – пески; 4 – пизолитовые руды; 5 – протерозойские кварциты. Из работы [22].

[**Fig. 13.** Geological section of the Groot Island manganese ore deposit: (1) – hard clays, soils; (2) – manganese oxide ores; (3) – sands; (4) – pisolite ores; (5) – Proterozoic quartzites. From work [22].]

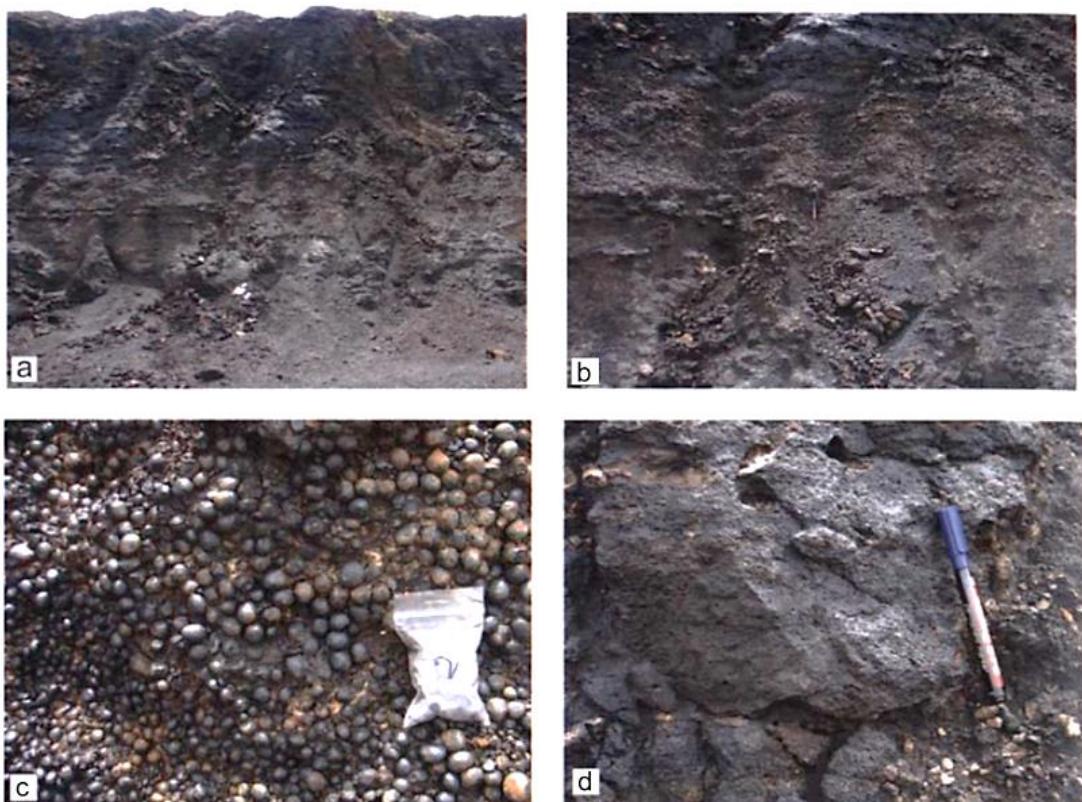


Рис. 14. Строение горизонта марганцевых руд на месторождении Грут-Айленд (стенка карьера): а – общий вид стенки карьера, б – средняя часть стенки карьера, в – крупнопизолитовые руды, г – мелкопизолитовые руды [22].

[**Fig. 14.** The structure of the manganese ore horizon at the Groote Eylandt deposit (quarry wall): (a) – general view of the quarry wall, (b) – middle part of the quarry wall, (c) – coarse pisolite ores, (d) – fine pisolite ores [22].]

Мощность рудного пласта колеблется от 0.5–2 до 15–20 м (в среднем около 3–4 м), а перекрывающих отложений – от нескольких сантиметров до 30 м. 37–52 % (среднее – 41 %); железа – 2–11.5 %; кремнезема – 3–13 %; фосфора – 0.07–0.09 %; серы – 0.07–0.08 %. Руды легко обогащаются. Отработка ведется открытым способом. Известны также более мелкие месторождения подобного типав Западной Австралии (Вуди-Вуди, Майк).

Но наиболее масштабные месторождения Mn образовались в кайнозойской КВ на гондитах – метаморфических марганцево-кремнистых породах. Руды марганца на месторождениях обычно сложены псило-

меланом, пиролюзитом и вернадитом. Они образуются в результате окисления родонита, мanganокальцита и родахрозита. Крупнейшими запасами обладает ЮАР – 5.3 млрд т. Здесь, в 112 км севернее железнорудного месторождения Зишен, в районе Постмасбурга, развиты Fe-Mn и Mn руды на итабиритах и гондитах. Значительны запасы в Габоне (4.5 %, месторождение Моанда, 50–52 % Mn в рудах), Намибии (Fe-Mn, Откосонду) Бразилии (3.3 %, Мату-Гросу), Индии (1.9 %). Крупные запасы Mn в КВ обнаружены в последнее время в Боливии в пределах железнорудного бассейна Эль-Мутун.

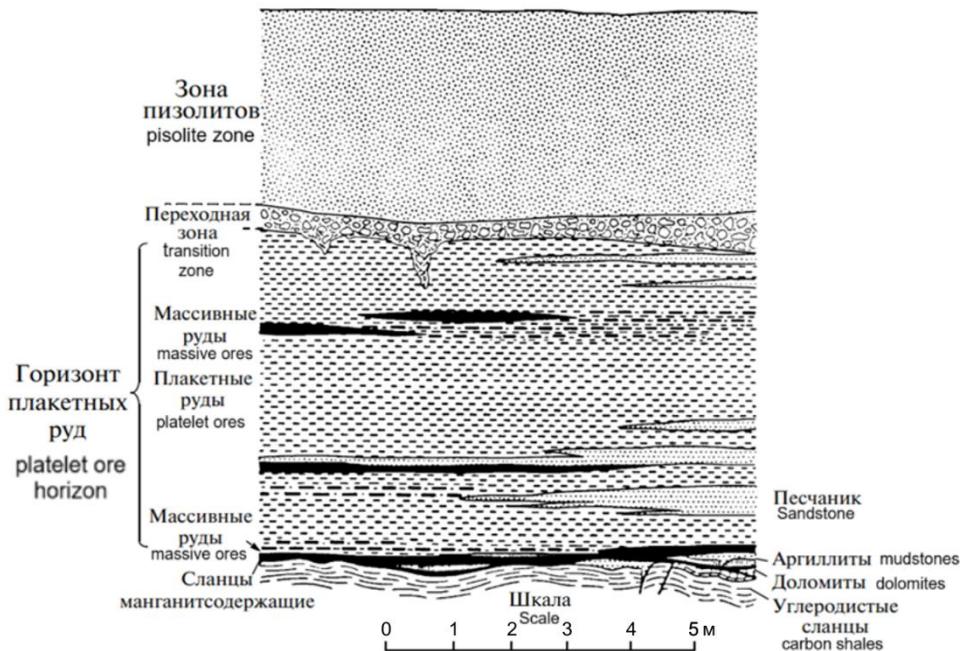


Рис. 15. Схема строения марганцеворудной толщи франсвильской формации [24].
[Fig. 15.] The scheme of the structure of the manganese-ore stratum of the Fransvillian formation [24].]

В Габоне (Африка) находится крупнейшее в мире месторождение богатых гипергенных марганцевых руд Моанда в КВ (рис. 15), на которое приходится 15 % мировой добычи Mn. Толщина рудной залежи составляет от 0.5 до 4–5 м. Горизонты разных типов руд по площади плато распространены неравномерно – могут отсутствовать или слагать горизонты толщиной до 2 м. Нижняя его часть, представленная массивными оксидными рудами, возможно имеет мезозойский возраст. Они с размывом перекрываются делювиально-пролювиальными отложениями, образованными за счет размыва и осаждения вещества кайнозойской КВ. Эти отложения представляют блоковые, пакетные и пизолитовые марганцевые руды. Среднее содержание Mn в них 48 %, что свидетельствует о последующем выветривании делювиально-пролювиальных образований, как это происходило при формировании уникального месторождения бокситов Сангареди в Гвинее [20].

Таким образом, формирование марганцевых руд в КВ связано со значительной геохимической активностью элемента и способностью при небольшом кларке (0.95) давать концентрации в породах в десятки процентов. Этому способствовали процессы рециклинга, обусловившие наличие в материнских породах различного, в первую очередь метаморфогенно-осадочного генезиса, особенно карбонатных, повышенных содержаний элемента, а также воздействие биоса, на порядок ускоряющее геохимические процессы с участием марганца [25].

И если появившиеся в раннем палеозое его аккумуляции карстового типа определены abiогенными процессами, то с выходом на сушу растительности влияние органики на процессы выветривания стало одним из главных факторов. Месторождения Mn стали фор-

мироваться не только на карбонатных, но и силикатных породах. Так на гондитах с содержанием Mn в несколько процентов образовались месторождения марганцеворудного поля Калахари (ЮАР).

Заключение

В КВ сосредоточены практически все запасы бокситов и каолинов, порядка 80 % силикатного никеля, около 50 % богатых железных руд и марганца от общих разведанных. В КВ накапливаются Au, REE, U, Ti, Zr, фосфориты и другие, менее известные виды минерального сырья. Необходимым условием образования аккумуляций минерального сырья является присутствие полезного компонента и форма его нахождения в материнской породе. В ней содержание различных элементов может колебаться от сотых долей (REE) до 20 и более (Fe) процентов.

Первые аккумуляции БЖР появились в середине девона. Поначалу их средняя мощность составляла не более 10 м в площадных и до 20–30 м в линейных корах, приуроченных к тектоническим нарушениям и контактам различных по составу пород (джеспилиты-сланцы, гипербазиты-осадочные образования). В карбоне и мезозое мощности площадных КВ составляли первые десятки метров, линейных – первые сотни метров, а в кайнозое – 50–60 и до 300 и более соответственно. Но при этом могло быть наложение молодых КВ на более древние. Так на КМА доказаны иллит-каолинитовые КВ девона, а возможно и более ранние, по которым развит элювий, сложенный полуторными окислами.

Формирование повышенных концентраций железа при выветривании начинается уже в зоне начального разложения, а наибольшее его количество образуется в зоне конечного разложения (полуторных окислов) и

кирасе. При этом большое значение имеет нарастающее со временем влияние органики, что повлияло на увеличение разведанных запасов БЖР, которых в кайнозое больше, чем за все предыдущие времена.

Анализ распределения запасов железа в фанерозое показал, что его накопление происходило в эпохи выравнивания территорий и теплого гумидного климата, интенсивного образования КВ на сушу и ослабленного приноса терригенного вещества в морские бассейны. Такие условия были в позднем девоне – раннем карбоне (Восточная Европа), юре и мелу (Урал, Украина, Австралия), кайнозое (страны с тропическим климатом). Особенно масштабной была последняя эпоха, когда накопилась большая часть разведанных БЖР.

Первые аккумуляции бокситов появились в раннем палеозое. Они карстового типа, развиты в карбонатных толщах, немногочисленны и пока не представляют промышленного интереса. В среднем девоне в связи с выходом растительности на сушу и влиянием биоса процессы выветривания, выразившиеся в увеличении их интенсивности, появились первые месторождения высококачественных бокситов в КВ на карбонатных породах, в заметных количествах, содержащих алюмосиликатный компонент (мергели, прослои глин и вулканогенного материала). В карбоне интенсивность выветривания и спектр материнских пород расширились. Возник сублатеритный тип бокситов, отличающийся от типичного латеритного наличием полного профиля выветривания с 4-мя зонами, в котором бокситы приурочены к его самой верхней части.

В мезозое накопление глинозема тяготеет к подвижным поясам, где преобладает карстовый тип высококачественных бокситов. На докембрийских и молодых платформах процессы выветривания алюмосиликатных пород приводили к формированию преимущественно каолинов. Кайнозой – основная эра, когда образовалось абсолютное большинство месторождений и основные запасы бокситов Мира. Основной их тип – латериты, в подвижных поясах продолжали формироваться карстовые месторождения.

Формирование марганцевых руд в КВ связано с активной биогеохимической активностью элемента, большей его подвижности по сравнению с железом и алюминием и сменами валентности. Это в одних случаях приводило к его выносу из пород профиля выветривания, в других – к концентрациям. Такое поведение Mn способствовало при небольшом klarke давать аккумуляции в десятки процентов. В раннем палеозое его аккумуляции карстового типа определены abiогенными процессами, позднее влияние органики на процессы выветривания стало одним из главных факторов, и месторождения Mn стали формироваться не только на карбонатных, но и силикатных породах с повышенным содержанием элемента.

ЛИТЕРАТУРА

- Савко А. Д., Бугельский Ю. Ю., Новиков В. М., Слукин А. Д., Шевырев Л. Т. Коры выветривания и связанные с ними полезные ископаемые. Воронеж: Истоки, 2007. 355 с.
- Савко А. Д. Минерагения кор выветривания. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж: Воронеж. гос. ун-та. Вып. 95. 2016. 144 с.
- Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Историческая минерагения. В 3-х томах. Том 1. Введение в историческую минерагению. Воронеж: ВГУ. 2005. 587 с; Том 2. Историческая минерагения древних платформ. Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с. Том 3. Историческая минерагения подвижных суперпоясов. Воронеж: ВГУ. 622 с.
- Шевырев Л. Т., Савко А. Д. Рудные месторождения России и Мира. Справочник и учеб. пособие. Издание 3-е исправленное и дополненное. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж: Воронеж. гос. ун-та. Вып. 101. 2017. 457 с.
- Хамерсли (Hamersley) Железорудный бассейн в Австралии, в штате Зап. Австралия [Электронный ресурс]: URL: old.bigrcc.ru/geology/text/4728788 (дата обращения 01.06.2023).
- Никулин И. И. Савко А. Д. Железорудные коры выветривания Белгородского района Курской магнитной аномалии. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж: Воронеж. гос. ун-та. Вып. 85. 2015. 102 с.
- Бугельский Ю. Ю., Васкес О., Григорьева И. И., Добропольская М. Г., Кабрера Р., Кравченко Г. Г., Крамер Р. Лаверов Н. П., Малиновский Е. П., Павлов Н. Е., Пантелеон Г., Понсе Н., Сафонов Ю. Г., Толкунов А. Е., Формель Ф., Эрнандес Х. Рудные месторождения Кубы. М.: Наука, 1985. 243 с.
- Хасан Тиной. Основные и ультраосновные породы массива Калум (Гвинея) и перспективы его платиноносности: дисс. ... канд. геол. мин наук. Л.: Горный ин-т. 1985. 152 с.
- Савко А. Д. Эволюция накопления железа в истории Земли // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 3. С. 4–39.
- Антропова И. Г., Алексеева Е. Н., Доржиева О. У., Гуляшинов П. А., Палеев П. Л. Общая характеристика месторождений глиноземного сырья Республика Бурятия и перспективы их освоения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 11–2. С. 357–362.
- Михайлов Б. М. Региональные и локальные закономерности размещения бокситов. Л.: Недра, 1978. 68 с.
- Платформенные бокситы СССР: Изд-во «Наука», 1971. 387 с.
- Савко А. Д. Овчинникова М. Ю. Эволюция бокситонакопления в истории Земли // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. № 1. С. 4–28.
- Liu L., Liu X., Yang Sh., Zhao L., Sun X., Zhang J. Mineralogical and geochemical investigations on the Early Permian Yuxi karstic bauxite deposit, Central Yunnan, China // Ore Geology Reviews. 2023. Vol. 153. 105296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105296>.
- Железные руды КМА. Под ред. В. П. Орлова, И. А. Шевырева, Н. А. Соколова. М.: Геоинформарк, 2001. 616 с.
- Сиротин В. И., Белявцева Е. Е. Бокситы КМА. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж: Воронеж. гос. ун-та. Вып. 93. 2016. 104 с.
- Бардоши К. Карстовые бокситы. Мир, 1981. 447 с.
- Horbe A. M. C., Anand R. R. Bauxite on igneous rocks from Amazonia and Southwestern of Australia: Implication for weathering process // Journal of Geochemical Exploration. 2011. Vol. 111. I. 1–2. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.06.003>.
- Sidibe M. , Yalcin M.G. , Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa // Journal of African Earth Sciences. 2019. Vol. 149. P. 348–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.08.017>.

20. Мамедов В. И., Часов А. А., Оконов Е. А., Макарова М. А., Боева Н. М. Крупнейшая в Мире бокситоносная провинция Фута-Джалон-Мандино (Западная Африка). Часть I Общие сведения // Геология рудных месторождений. 2020. Том 62. № 2. С. 178–192.
21. Дымкин А. М., Чайка В. М. Эволюция накопления природных соединений семейства железа. М.: Наука, 1992. 256 с.
22. Кулешов В. Н. Марганцевые породы и руды: геохимия изотопов, генезис, эволюция рудогенеза. Отв. ред. М. А. Федонкин. М.: Научный мир, 2013. Вып. 606. 508 с.
23. Варенцов И. М., Головин Д. И. Марганцевое месторождение Грут-Эйланд, Северная Австралия: К-Аг-возраст криптомелановых руд и аспекты генезиса // ДАН СССР. 1987. Т. 294. № 1. С. 203–207.
24. Кулешов В. Н. Месторождения марганца. Сообщение 1. Генетические модели маргацевого рудогенеза // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 5. С. 527–550.
25. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия марганца в процессах гипергенеза // Биосфера. 2013. Т. 5. № 1. С. 21–36.

GEOLOGY, SEARCH AND INVESTIGATION OF SOLID MINERAL RESOURCES, MINERAGENY

UDC: 553.481

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/86-103>

Received: 14.05.2024

Accepted: 20.05.2024

Published online: 28.06.2024

Minerageny of weathering crusts. Part one: Iron, aluminium, and manganese ores

©2024 A. D. Savko[✉], M. Yu. Ovchinnikova

Voronezh State University,
1 Universitetskaya pl., 394018, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Introduction: Weathering crusts contain almost all the reserves of bauxite and kaolinite, about 80 % of silicate nickel, about 50 % of high-grade iron ores, and manganese of all discovered reserves. They also accumulate Au, REE, U, Ti, Zr, phosphorites, and other types of minerals. The accumulation of minerals depends on the presence of a valuable element and the form of its presence in the parent rock. The content of various elements in the parent rock can vary from one hundredths (REE) to 20 or more (Fe) percent. Types of minerals in weathering crusts have been studied in many publications, including by the authors of the article. However, there have not been enough studies dedicated to the correlation between minerals and weathering crusts of various climatic zones and the connection between their accumulation and certain types of relief of the weathering crust. No special attention has been paid to the distribution of valuable elements along the weathering crust profile, i.e., in which zones of the weathering profile a particular type of mineral tends to be present. This article is devoted to these unresolved issues. This is the first of the series of three articles dedicated to the minerageny of Fe, Al, Mn. The second part will be devoted to other metals (Ni, Co, Au, REE, etc.), and the third to non-metals (kaolinites, phosphorites, zeolites, etc.).

Methodology: In this article, the authors used their own data related to the study of a number of minerals in weathering crusts (bauxites, kaolinites, high-grade iron ores, siliceous raw materials, and zeolites). The methods of the study included formation, facies, paleogeographic, and comparative lithological methods, as well as a stadial analysis based on a detailed study of the material composition of the rocks in the weathering crusts. Stadial analysis was used due to the examination of rocks belonging to various zones of the weathering profile. We also considered the tectonic factor acting through the relief. The epigenetic



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Arkady D. Savko, e-mail: savko@geol.vsu.ru

processes responsible for the enrichment or depletion of the valuable element in the weathered rocks was also taken into account.

Results and discussion: The first accumulations of high-grade iron ores appeared in the middle of the Devonian. At first, their average thickness was no more than 10 m in areal crusts and up to 20–30 m in linear crusts. In the Carboniferous and Mesozoic, the thickness of the areal weathering crusts was the first tens of meters, the thickness of the linear crusts was the first hundreds of meters, and in the Cenozoic, they were 50–60 and up to 300 and more, respectively. However, younger and older weathering crusts could overlap. For example, it was proved that the Kursk Magnetic Anomaly has the illite-kaolinite weathering crusts of the Devonian, and possibly even earlier ones, with developed eluvium composed of sesquioxides. The formation of increased concentrations of iron began in the zone of initial decomposition, and its greatest amount formed in the zone of final decomposition (sesquioxides) and Cuirasse. However, the impact of organic matter increasing over time was of great importance, which influenced the increase in the discovered reserves of high-grade iron ores, which were larger in the Cenozoic than in all previous periods. Bauxites appeared in the early Paleozoic. They are karst, developed in carbonate strata, few in number, and are not yet of industrial interest. In the Middle Devonian, due to the appearance of vegetation on land and its influence on the weathering processes, which resulted in an increase in their intensity, the first deposits of high-quality bauxite appeared in weathering crusts in carbonate rocks, which contained significant quantities of an aluminosilicate component (marls, interlayers of clay, and volcanogenic material). In the Carboniferous, the intensity of weathering and the spectrum of parent rocks expanded. A sublateritic type of bauxites appeared, which differed from the typical lateritic bauxites by the presence of a complete weathering profile with 4 zones, in which bauxites were found in its uppermost part. In the Mesozoic, the alumina tended to accumulate in mobile belts with prevailing karst bauxites. In the Precambrian and young platforms, the processes of the weathering of aluminosilicate rocks mainly led to the formation of kaolinites. The absolute majority of deposits and the main global reserves of bauxite formed in the Cenozoic. They were mainly laterites; skarn deposits continued to form in mobile belts. The formation of manganese ores in weathering crusts was associated with the active biogeochemical activity of the element, its greater mobility compared to iron and aluminium, and valence changes. This, in some cases, led to its loss in the rocks of the weathering profile, and in others to its concentration. This behavior of Mn contributed to the accumulation of tens of percent at a small clarke number (0.95). In the early Paleozoic, manganese ores of the karst type were determined by abiogenic processes. Later, the influence of organic matter on weathering processes became one of the main factors and Mn deposits began to form not only in carbonate, but also in silicate rocks with an increased content of this element.

Conclusion: The formation of minerals occurred at different stages of the weathering crust formation. For iron, it began in the zone of initial decomposition and reached its maximum in the zone of final decomposition. Alumina, which is part of bauxites, accumulated only in the uppermost zone of the sesquioxides of the weathering profile. The peak of manganese accumulation was within the zone of intermediate decomposition, where its ores contained inclusions of kaolinite clays.

Keywords: Weathering crust, high-grade iron ores, bauxites, manganese.

For citation: Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu. Minerageny of weathering crusts. Part one: Iron, aluminum, and manganese ores //Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2024. no. 2. pp. 86–103. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/86–103>

REFERENCES

1. Savko A. D., Bugelsky Yu. Yu., Novikov V. M., Slukin A. D., Shevyrev L. T. *Kory vy-vetrvaniya i svyazannye s nimi poleznye iskopayemye* [Weathering crusts and associated minerals]. Voronezh, Istoiki publ., 2007, 355 p. (In Russ.)
2. Savko A. D. Minerageniya kor vyvetrvaniya [Minerageny of the weathering crust]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 95, 2016, 144 p. (In Russ.)
3. Zinchuk N. N., Savko A. D., Shevyrev L. T. *Istoricheskaya minerageniya*. [Historical Minerageny]. In 3 vol. Vol. 1. *Vvedenie v istoricheskuyu minerageniyu*. [Introduction to historical mineralogy]. Voronezh, VSU publ., 2005, 587 p; Vol. 2. *Istoricheskaya minerageniya drevnikh platform*. [Historical Minerageny of Ancient Platforms]. Voronezh, VSU publ., 2007, 570 p. Vol. 3. *Istoricheskaya minerageniya podvizhnikh superpoyasov*. [Historical mineralogeny of mobile superbelts]. Voronezh, VSU publ., 622 p. (In Russ.)
4. Shevyrev L. T., Savko A. D. *Rudnye mestorozhdeniya Rossii i Mira. Spravochnik i uchebnoe posobie*. Izdanie 3-e ispravленное и дополненное [Ore deposits of Russia and the World. Reference book and study guide. 3rd edition corrected and expanded]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 101, 2017, 457 p. (In Russ.)
5. Khandersli (Hamersley), Zhelezorudnyi bassein v Avstralii, v shtate Zap. Avstraliiya. [Hamersley, iron ore basin in Australia, in the state of Western Europe. Australia]. Available at: old.bigrf.ru/geology/text/4728788 (accessed 01.06.2023) (In Russ.)
6. Nikulin I. I. Savko A. D. Zhelezorudnye kory vyvetrvaniya Belgorodskogo raiona Kurskoi magnitnoi anomalii [Iron ore weathering crusts of the Belgorod region of the Kursk magnetic anomaly]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU

- publ., vol. 85, 2015, 102 p. (In Russ.)
7. Bu ugelsky Yu. Yu., Vasquez O., Grigorieva I. I., Dobrovolskaya M. G., Cabrera R., Kravchenko G. G., Kramer R. Lavrov N. P., Malinovsky E. P., Pavlov N. E., Pantaleon G., Ponce N., Safonov Yu. G., Tolkunov A. E., Formel F., Hernandez H. *Rudnye mestorozhdeniya Kuby* [Ore deposits of Cuba]. Moscow, Nauka publ., 1985. 243 p. (In Russ.)
8. Khasan Tinoi. *Osnovnye i ul'traosnovnye porody massiva Kalum (Gvineya) i per-spektivy ego platinosnosti*: diss. kand. geol. min nauk [Basic and ultrabasic rocks of the Kalum massif (Guinea) and prospects for its platinum content: diss. Ph.D. geol. min. sciences]. Leningrad, Gornyi in-t, 1985, 152 p. (In Russ.)
9. Savko A. D. Evolution of iron accumulation in the history of the Earth. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 4–39. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/4-39>
10. Antropova I. G., Alekseeva E. N., Dorzhieva O. U., Gulyashinov P. A., Paleev P. L. General characteristics of deposits of alumina raw materials in the Republic of Buryatia and prospects for their development. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 11–2, pp. 357–362 (In Russ.)
11. Mikhailov B. M. *Regional'nye i lokal'nye zakonomernosti razmeshcheniya boksitov* [Regional and local patterns of bauxite distribution]. Leningrad, Nedra publ., 1978, 68 p. (In Russ.)
12. *Platformennye boksy SSSR* [Platform bauxites of the USSR]. Moscow, Nauka publ., 1971, 387 p. (In Russ.)
13. Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu. The evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 4–33 DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9096> (In Russ.)
14. Liu L., Liu X., Yang Sh., Zhao L., Sun X., Zhang J. Mineralogical and geochemical investigations on the Early Permian Yuxi karstic bauxite deposit, Central Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 2023, vol. 153, 105296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105296>.
15. *Zhelezye rudy KMA* [Iron ores of the KMA]. Ed. V. P. Orlova, I. A. Shevyreva, N. A. Sokolova. Moscow, Geo-informark publ., 2001. 616 p. (In Russ.)
16. Sirotin V. I., Belyavtseva E. E. Boksy KMA [Bauxites KMA]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 93, 2016, 04 p. (In Russ.)
17. Bardoshi D. *Karstovye boksy* [Karst bauxites]. Mir publ., 1981. 447 p. (In Russ.)
18. Horbe A. M. C., Anand R. R. Bauxite on igneous rocks from Amazonia and Southwestern of Australia: Implication for weathering process. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 111, is. 1–2, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgx.2011.06.003>.
19. Sidibe M., Yalcin M. G., Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, vol. 149, pp. 348–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.08.017>.
20. Mamedov V. I., Chausov A. A., Okonov E. A., Makarova M. A., Boeva N. M. Krupneishaya v Mire boksitonosnaya provintsiya Futa-Dzhalon-Mandino (Zapadnaya Afrika). Chast' I Obshchie svedeniya [The world's largest bauxite-bearing province Futa-Jalon-Mandino (West Africa). Part I General information]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of ore deposits*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 178–192 (In Russ.)
21. Dymkin A. M., Chaika V. M. *Evolutsiya nakopleniya prirodnykh soedinenii semeistva zheleza* [Evolution of accumulation of natural compounds of the iron family]. Moscow, Nauka publ., 1992, 256 p. (In Russ.)
22. Kuleshov V. N. *Margantsevye porody i rudy: geokhimiya izotopov, genetika, evolutsiya rudogenza* [Manganese rocks and ores: geochemistry of isotopes, genesis, evolution of ore genesis]. Ed. M. A. Fedonkin. Moscow, Nauchnyi mir publ., 2013, vol. 606, 508 p. (In Russ.)
23. Varentsov I. M., Golovin D. I. Margantsevoe mestorozhdenie Grut-Eiland, Severnaya Avstraliya: K-Ag-vozrast kriptomelanykh rud i aspekty genezisa [Manganese deposit Groote Eyland, Northern Australia: K-Ar age of cryptomelane ores and aspects of genesis]. *DAN SSSR – Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1987, vol. 294, no. 1, pp. 203–207 (In Russ.)
24. Kuleshov V. N. Manganese deposits: Communication 1. Genetic models of manganese ore formation. *Lithology and Mineral Resources*, 2011, vol. 46, no. 5, pp. 473–493. DOI 10.1134/S0024490211050038.
25. Judovich Ja. Je., Ketris M. P. Geohimija marganca v processe gipergeneza [Manganese geochemistry in supergene processes]. *Biosfera – Biosphere*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 21–36 (In Russ.)

Савко Аркадий Дмитриевич, д. г.-м. н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: savko@geol.vsu.ru;
ORCID 0000-0003-2133-3317

Овчинникова Марина Юрьевна, к.г.-м.н., преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ovchinnikova@geol.vsu.ru;
ORCID 0000-0002-9143-0051

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Arkady D. Savko, Dr. habil. in Geol.-Min, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: savko@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0003-2133-3317

Marina Yu. Ovchinnikova, PhD in Geol.-Min, Lecturer, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ovchinnikova@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0002-9143-0051

All authors have read and approved the final manuscript.