

Минерагения кор выветривания. Сообщение второе: руды никеля и кобальта, золота, редких металлов

©2024 А. Д. Савко✉, М. Ю. Овчинникова

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: в корах выветривания (КВ) Мира сосредоточены порядка 80 % силикатного никеля, около 10 % кобальта, 1 % золота и не менее 10–15 % редких металлов (РМ). Запасы последних в КВ считаются суммарно с запасами в материнских породах, поэтому отдельно по каждому из них пока точных данных нет, а приведенная цифра является приблизительной. Необходимым условием аккумуляции металлов является наличие полезного компонента в материнской породе. В ней указанных выше металлов от сотых долей до 1–2 % и более процентов.

Методика исследований и фактический материал приведены в сообщении 1 [1].

Результаты и обсуждение: месторождения силикатных Ni и Co в КВ на альпинотипных ультраосновных породах, появились только в мезозое. Они сформировались в эпохи мощного корообразования с возрастами поздний триас-ранняя юра и ранний мел. Мезозойские КВ содержат незначительные запасы руд Ni и Co. Они сосредоточены преимущественно на территории России в пределах Урала и в Казахстане. Основная часть Ni приурочена к зоне нонтронитовых глин и нижней части зоны охр КВ. Более 80 % запасов силикатного никеля связаны с латеритами кайнозоя. Они широко развиты на территориях стран с тропическим климатом. Наиболее качественных руды тяготеют к зонам дезинтегрированных серпентинитов и сапролитов. т. Самые богатые залежи фиксируются на пологих склонах и в седловинах горных отрогов. Первые редкие аккумуляции золота в КВ известны в палеозое. В мезозое количество месторождений этого металла резко возросло. В них золото могло накапливаться по всему профилю выветривания, но наибольшие содержания приурочены к иллит-каолининовым глинам зоны гидролиза. Основное же количество месторождений и запасов металла сосредоточено в латеритных КВ кайнозоя тропических стран. Оно концентрируется в сапролите, литомарж и кирасе латерита, а наибольшие его содержания тяготеют к верхней части профиля выветривания. Золото может накапливаться при формировании бокситов при наличии его в материнских породах. В КВ и образованиях их ближайшего сноса сосредоточены крупные запасы РМ. Их носителями в материнских породах чаще всего являются минералы карбонатитов, пегматитов и гранитов. Среди редких металлов в КВ концентрируются тантал и ниобий в виде самостоятельных минералов, галлий в бокситах, редкоземельные элементы как в составе минералов, так и «ионных руд». Металлы сорбированы глинистыми минералами. В КВ редкоземельные элементы сосредоточены в остаточных минералах-носителях (монацит, циркон, ортит, ксенотим и другие), а также в «ионных» рудах глинистого элювия. Мощные КВ с РМ образовались уже в палеозое на карбонатитах (Восточная Сибирь). В мезозое появились КВ с ионными рудами на гранитоидах (Китай). Для кайнозоя характерны латеритные КВ в тропических странах с многочисленными в них месторождениями РМ.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Савко Аркадий Дмитриевич, e-mail: savko@geol.vsu.ru

Заключение: на формировании месторождений КВ рассмотренных металлов сказалась эволюция кооробразования и связанного с ним рудогенеза во времени. Особое значение имел выход растительности на сушу в девоне, следствием чего была резкая интенсификация процессов выветривания и образование гипергенных месторождений. Наиболее масштабные скопления рассмотренных металлов приурочены к кайнозою.

Ключевые слова: Кора выветривания, никель и кобальт, золото, редкие металлы.

Для цитирования: Савко А. Д., Овчинникова М. Ю. Минерагения кор выветривания. Сообщение второе: руды никеля и кобальта, золота, редких металлов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 4. С. 74–102. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/74-102>

Введение

Настоящая работа продолжает тематику исследований месторождений различных полезных ископаемых в корях выветривания (КВ). Если в сообщении 1 рассматривались месторождения бокситов, железа и марганца [1], то сообщение 2 посвящено аккумуляциям никеля и кобальта, золота, редких металлов (РМ) в КВ.

Месторождения гипергенного генезиса известны с фанерозоя. О более древних аккумуляциях полезных компонентов в КВ можно судить по коррелятным им осадкам. К ним относятся железистые кварциты протерозоя, высокоглиноземистые породы, мономинеральные кварцевые пески, золото-урановые россыпи Витватерсранда.

Первые аккумуляции полезного компонента собственно в КВ, представленного глиноземом, известны с кембрия. Они образовались за счет разложения, содержащего алюмосиликаты, туфогенного и глинистого материала в легкорастворимых карбонатных породах. В раннем палеозое появились некрупные месторождения богатых железных руд и марганца. Первые образовались при выветривании джеспилитов, вторые – карбонатных пород, содержащих марганец. С выходом на сушу растительности в среднем девоне химические процессы с участием органики сменились биохимическими при выветривании. Это резко усилило разложение материнских пород и синтез новообразований, что привело к формированию и других видов минерального сырья.

Одним из обязательных факторов формирования полезного компонента является его содержание и форма нахождения в материнских породах, а также геохимические свойства. Количества никеля и кобальта в исходном субстрате наибольшие в гипербазитах. Так если кларк Ni в земной коре 0.006 %, то в ультраосновных породах, где он находится в кристаллических структурах алюмосиликатов, повышается до 0.13–0.46 %. Поэтому достаточно концентрации 5–10 кларков для образования промышленных аккумуляций этого элемента. Никель в форме сульфидов в материнских породах мигрирует из профиля выветривания. Сходная ситуация с кобальтом. Единственным отличием является тяготение этого элемента к оксидам марганца в КВ.

В отличие от никеля и кобальта золото имеет очень низкий кларк (4.3 мг/т), но очень высокий коэффициент концентрации (2000). Промышленные содержания металла могут быть только в КВ на мате-

ринских породах, обогащённых этим элементом, обычно в результате гидротермальной деятельности. Свободное золото остается на месте при выветривании, а связанное в сульфидах («упорное») может мигрировать в профиле выветривания, концентрируясь на геохимических барьерах. При этом происходит увеличение пробы металла в связи с выносом из него примесей.

К редким металлам (РМ) относятся 35 элементов [2]. Среди них Li, Rb, Cs, Be, редкоземельные элементы, (TR или REE), Re, Cd, Ga, In, Ta, Nb, Hf, Se, Te, Sc, V и другие. Они широко используются в высокотехнологических отраслях промышленности, при крекинге нефти, изготовлении вооружений и многих других производствах. Спрос на эти металлы постоянно растет.

В эндогенных условиях РМ образуются в карбонатах, пегматитах, гранитах. При формировании на них КВ происходит аккумуляция многих из рассматриваемых элементов, часть из них выносятся. Это зависит от их химических свойств. Среди них выделяются литофильные (Li, Rb, Cs, Be, Y, лантаноиды, Zr, Nb, Ta, Hf, Re), халькофильные (Cd, Ga, In, Tl, Ge, Se, Te) и сидерофильные (Sc, V) металлы. Первые генетически связаны с кислыми и щелочными, вторые с сульфидными рудами, третьи – с основными и ультраосновными породами. В КВ накапливаются тантал и ниобий в виде самостоятельных минералов, галлий (в бокситах), редкоземельные элементы. Последние могут быть как в составе минералов, так и «ионных руд», в которых РМ сорбированы глинистыми минералами. Остальные элементы чаще всего мигрируют из КВ.

Методика исследований и фактический материал

Как показано ранее [1], при создании предлагаемых сообщений, представляющих обзорные статьи, авторы опирались на методические приемы, изложенные в монографиях по КВ [3, 4]. Использовались стратиграфический, сравнительно-литологический, минералогический, петрографический, фациальный методы исследований, а также стадийный анализ. Применение последнего связано с формированием руд рассматриваемых металлов в различных зонах профиля выветривания. Учитывался и тектонический фактор, действующий через рельеф. Принимались во внимание и наложенные на КВ процессы, обогащающие либо обедняющие элювий полезным компонентом.

В основу фактического материала для настоящей статьи положены данные из трехтомника «Историческая минерагения» [5] и более поздней работы «Рудные месторождения России и Мира» [6]. В этих работах приводятся сведения о более 5000 значимых месторождений полезных ископаемых, в том числе из КВ. Широко использовались и другие литературные источники, содержащие сведения по месторождениям КВ.

Результаты исследований и их обсуждение
Месторождения никеля и кобальта

В мире основные запасы никеля связаны с гипергенными месторождениями КВ и только 14 % приходится на эндогенные сульфидные медно-никелевые руды (рис. 1). Запасы последних в России составляют порядка 90% и только 10 % приходятся на оксидно-силикатные руды. Сульфидные руды преобладают также в ЮАР, Канаде и Китае.

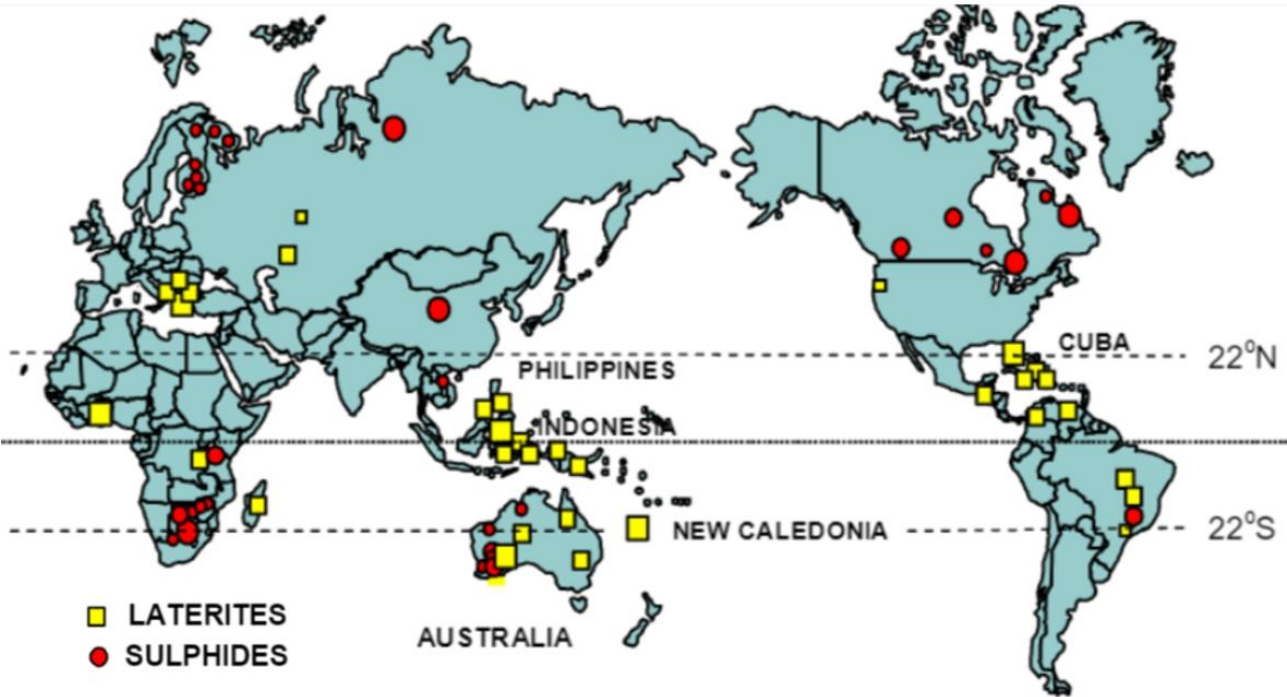


Рис. 1. Глобальное распределение месторождений никеля [7].
[**Fig. 1** Global distribution of nickel deposits [7].]

По данным Геологической службы США (USGS), общемировые запасы никеля по состоянию на январь 2023 г. составляли 102.1 млн т. Большая часть из них находится в Индонезии и Австралии, на долю каждой из которых приходится по 20.6 % общемирового объёма. Затем следуют Бразилия (15.7 %), Россия (7.3 %) и Новая Каледония (7 %). На Филиппины и Канаду в совокупности приходится 6.9 % мирового объёма.

Гипергенные месторождения никеля и кобальта

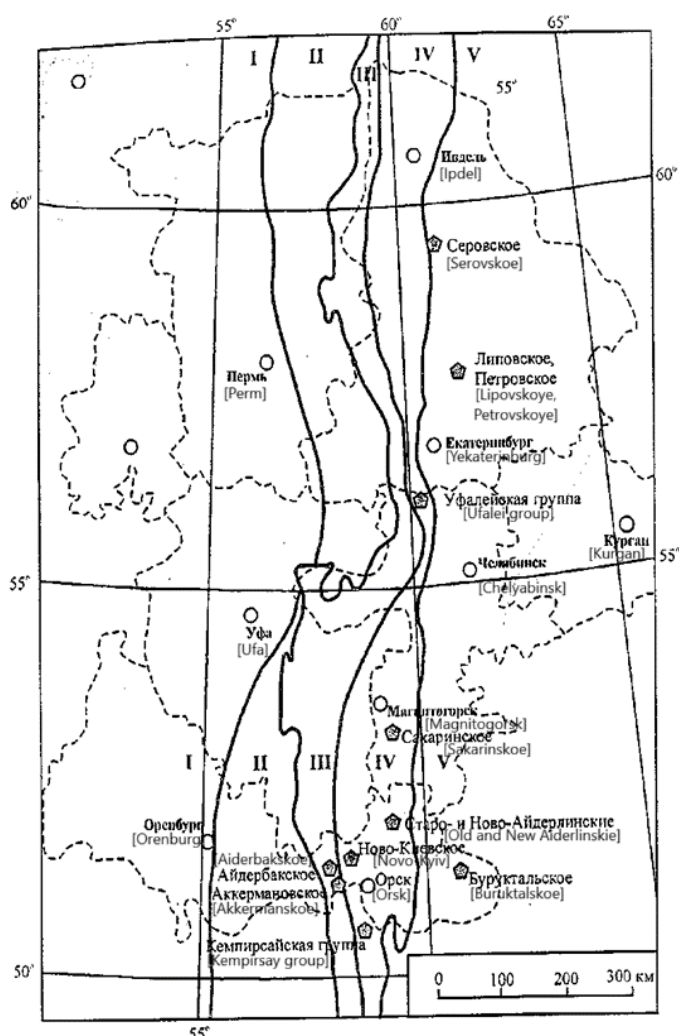
развиты в КВ на ультраосновных породах и появляются только с мезозоя. Но основная эпоха формирования аккумуляций этих металлов приходится на кайнозой, к которому приурочено абсолютное большинство месторождений. Они расположены в странах тропического климата. Распределение запасов Ni по странам приведено в таблице 1. В ней нет данных по запасам никеля Кубы, которые ранее определялись в 19 млн т.

Табл. 1. Основные показатели мировой сырьевой базы оксидно-силикатных руд
[**Table 1.** Main indicators of the world raw material base of supergene oxide-silicate ores]

Страна [Country]	Производство никеля в 2023 г., тыс. т [Nickel production in 2023, thousand tons]	Производство никеля в 2022 г., тыс. т [Nickel production in 2022, thousand tons]	Производство никеля в 2021 г., тыс. т [Nickel production in 2021, thousand tons]	Запасы никеля в 2023 г., тыс. т [Nickel reserves in 2023, thousand tons]
1	2	3	4	5
Индонезия [Indonesia]	1600	1800	1000	55000
Филиппины [Philippines]	345	400	370	4800
Россия [Russia]	222	200	250	8300

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5
Новая Каледония [New Caledonia]	200	230	190	7100
Австралия [Australia]	155	160	160	24000
Канада [Canada]	143	180	130	2200
Китай [China]	114	110	120	4200
Бразилия [Brazil]	88.5	89	100	16000
США [USA]	17.5	17	180	340
Южная Африка [South Africa]			31.8	
Колумбия [Colombia]			41	
Гватемала [Guatemala]			64.9	
Куба [Cuba]			49.9	



[Fig. 2. Nickel-bearing province of the Urals. [8]: Structural-geological zones: I – East European Platform; II – Pre-Ural; III – Central Ural; IV – Tagilo-Magnitogorskaya; V – East Ural.]

Геологическая служба США определяет общемировые запасы кобальта во всех его разновидностях в 25.5 млн тонн. Из них доля кобальта из месторождений КВ составляет не более 10 % от общемировых запасов. Он добывается на Кубе, Филиппинах, Индонезии и в некоторых других странах в качестве попутного с никелем компонента. Основная часть запасов Со приходится на эндогенные месторождения. Около половины всех известных на сегодняшний день запасов этого металла находится на территории Демократической Республики Конго (ДРК). По состоянию на 2019 г. на эту африканскую страну приходилось 64% глобальной добычи кобальта. Значительны запасы эндогенного кобальта в Австралии, ЮАР, России, Зимбабве.

Мезозойские месторождения. На Урале и в Казахстане к нижнемеловым относятся никеленосные месторождения КВ по гипербазитам (рис. 2). Выделяют три основных морфогенетических типа – площадной, линейный и линейно-площадной. Для месторождений первого типа характерно: 1 – площадное распространение без приуроченности к каким-либо крупным линейным структурам; 2 – образование КВ и руд Ni и Со преимущественно по гипербазитам; 3 – четко выраженное прямое зональное по вертикали строение профиля; 4 – пластообразная форма; 5 – равномерное распределение оруденения по площади и мощностей рудных залежей.

Рис. 2. Никеленосная провинция Урала. [8]: Структурно-геологические зоны: I – Восточно-Европейская платформа; II – Предуральская; III – Центрально-Уральская; IV – Тагило-Магнитогорская; V – Восточно-Уральская.

В КВ площадных плащеобразных месторождений развиты все четыре зоны (выщелоченных серпентинитов, керолитовая, нонторонитовая, охристая). Залежи кондиционных руд, как правило, приурочены к нижней части зоны охр, ко всей зоне нонторонитов и верхней части выщелоченных серпентинитов. Мощности руд от 3 до 15, но составляют обычно 5–8 м. В площадных кобальт-никелевых и никелевых месторождениях оруденение приурочено к КВ с керолито-охристым и керолито-охристо-кремнистым профилями элювия. Примерами площадных являются Айдербакское, некоторые участки Кемпирсайского (рис. 3), Серовского, Халиловского месторождений.

Для месторождений линейного типа характерны: 1

– приуроченность к протяженным и глубоким разломам, к широким зонам трещиноватости, сложным системам вдоль контактов ультрабазитов с вмещающими породами, к дайкам и интрузивным телам в ультрабазитах, контактам массивов с вмещающими породами; 2 – наличие признаков сильного выщелачивания и инфильтрации в КВ и их рудах; 3 – горизонтальная, а также прямая и обратная зональность КВ и месторождений; 4 – форма рудных тел в виде выполнения наклонных выклинивающихся книзу трещин или наклонных залежей. Состав руд в целом более разнообразен и изменчив, чем в месторождениях площадного типа. Выделяются линейно-трещинные, линейно-контактовые и контактово-карстовые месторождения.

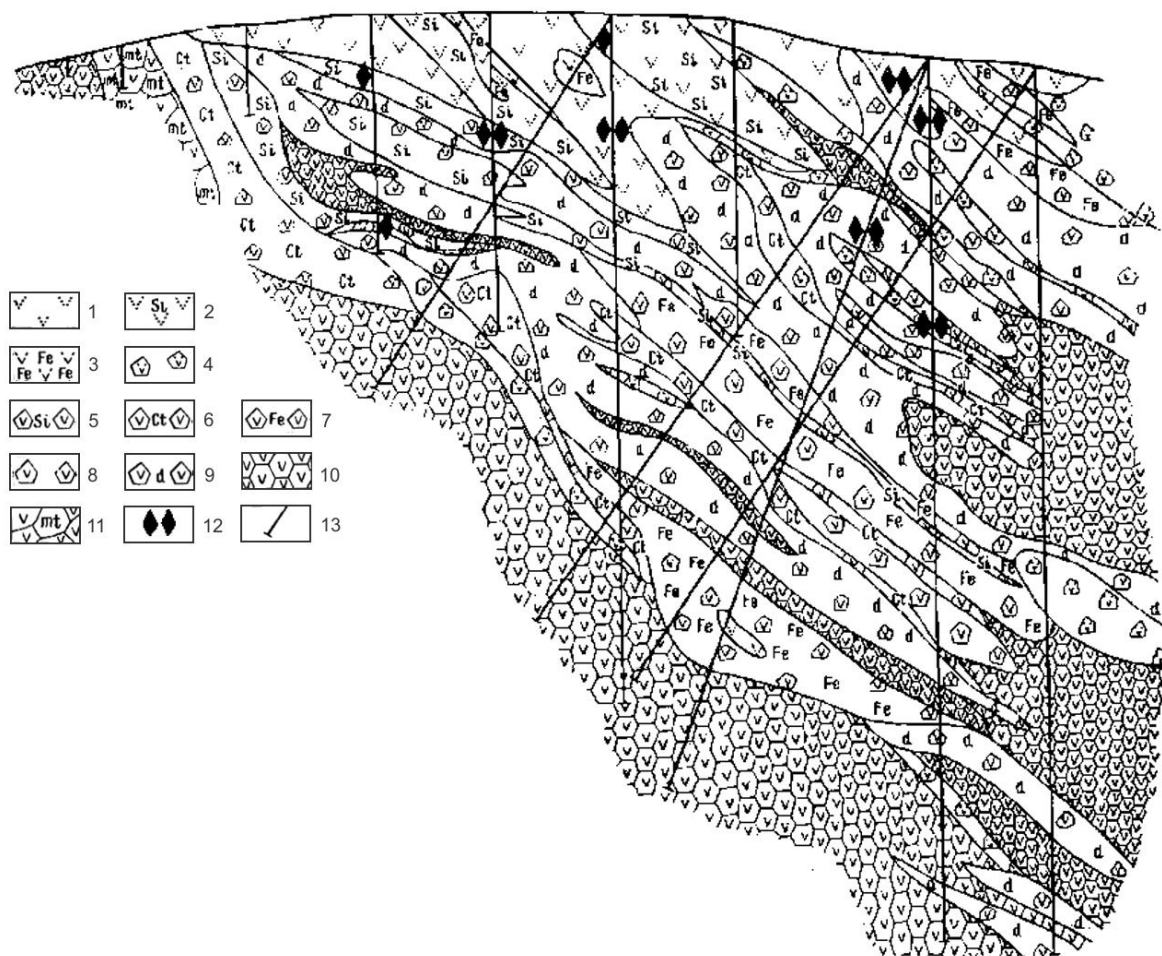


Рис. 3. Схематический разрез площадной КВ [9]: 1 – покровные отложения; 2 – охры по серпентинитам; 3 – обохренные нонторонитизированные серпентиниты; 4 – нонторониты и нонторонитизированные серпентиниты; 5 – выщелоченные, 6 – дезинтегрированные серпентиниты; 7 – охристо-глинистые продукты КВ габброидов; 8 – каолинизированно-монтмориллонитизированный, 9 – выщелоченный; габброиды; 10 – дезинтегрированный габбро; 11 – границы элювия (а) и пород (б).

[Fig. 3. Schematic section of the areal SQ [9]: (1) – cover deposits; (2) – ochres on serpentinites; (3) – circumfined nontronitized serpentinites; (4) – nontronites and nontronitized serpentinites; (5) – leached, (6) – disintegrated serpentinites; (7) – ochreous-clay products of KV gabbroids; (8) – kaolinized-montmorillonitized, (9) – leached gabbroids; (10) – disintegrated gabbroid; (11) – boundaries of eluvium (a) and rocks (b).]

Примером линейно-трещинного месторождения является крупное Аккермановское месторождение на Южном Урале (рис. 4) и Елизаветинское на Среднем Урале. Трещинная кора на Аккермановском месторождении содержит 0.6–0.8 % Ni и 0.06–0.1% Co. Она прослеживается на 5 км по простиранию при ширине

тектонической зоны порядка 300 м и глубине около 500 м. Профиль КВ на перидотитах охристо-каолиновый, осложненный окремнением, среднее содержание никеля 1.8–2.0 %. В рудах Елизаветинского месторождения 0.6–0.8 % Ni и 0.06–0.1% Co.

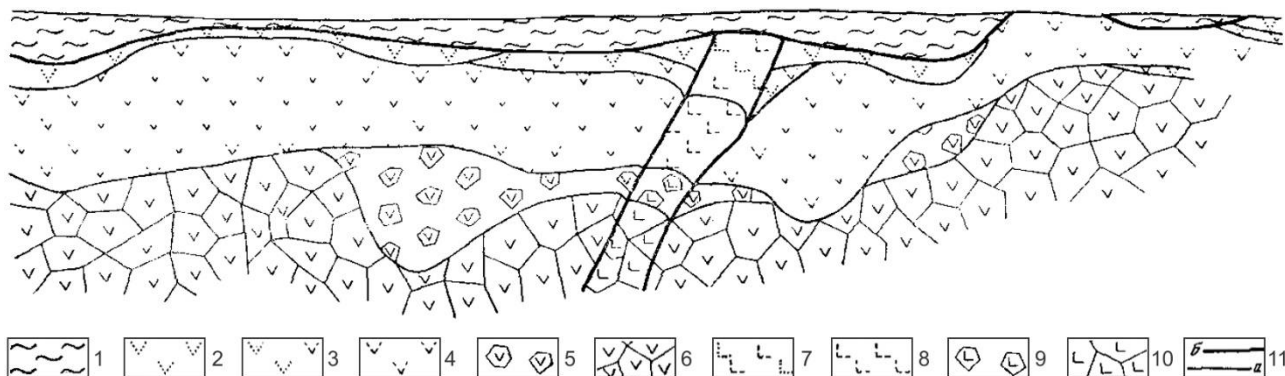


Рис. 4. Широтный разрез Ново-Аккермановского участка [9]. 1 – сильно разложенные серпентиниты; 2 – охристо-кремнистые образования; 3 – сильно разложенные обохренные серпентиниты с реликтовой текстурой; 4 – слабо разложенные серпентиниты; 5 – серпентиниты с кремнистыми прожилками; 6 – участки керолитизированного серпентинита. Серпентиниты: 7 – сетчатые обохренные; 8 – сетчатые слабо разложенные; 9 – сетчатые с доломитовыми прожилками, 10 – малоизмененные; 11 – с магнезитом; 12 – никелевые силикаты; 13 – скважина.

[Fig. 4. Latitudinal section of the Novo-Akkerman site [9]: (1) – strongly decomposed serpentinites; (2) – ochreous-siliceous formations; (3) – strongly decomposed rounded serpentinites with relict texture; (4) – weakly decomposed serpentinites; (5) – serpentinites with siliceous veins; (6) – areas of kerolitized serpentinite. Serpentinites: (7) – reticulated; (8) – slightly decomposed reticulated; (9) – reticulated with dolomite veins, (10) – little modified; (11) – with magnesite; (12) – nickel silicates; (13) – borehole.]

К линейно-контактовому типу относятся месторождения, возникшие при выветривании ультрабазитов вдоль контактов с метаморфическими силикатными породами, гранитами, секущими дайками (Липовское месторождение на Среднем Урале). Никель при выветривании сорбируется глинистыми минералами.

Контактово-карстовые месторождения связаны с КВ, развитыми в зоне контактов ультраосновных пород с карбонатными, где образуются обширные и глубокие карстовые полости. Рудные залежи имеют значительные размеры, состоят из отдельных тел пластообразной, столбообразной и неправильной форм. Они прослеживаются по падению на 200–250 и более метров. Руды наиболее качественные, Ni из них не только сорбируется другими минералами, но и образует собственные – гарниерит, непуит и другие.

Наибольшее количество месторождений Ni и Ni-

Со руд относится к линейно-площадному типу. К трещинно-площадным относится ряд месторождений Кемпирсайского и Шевченковского массивов ультрабазитов. Под охрами, обохренными нонтронитами и выщелоченными серпентинитами залегают круто падающие на глубину 70 и более метров клиновидные рудные тела, приуроченные к тектонически ослабленным зонам. Главным рудным минералом является никелевый керолит. Контактово-площадные месторождения (участки Буруктальского и Липовского) представлены породами керолитононтронито-охристого (рис. 5), реже керолито-охристого профиля. Никелевое оруденение связано с нонтронитами и керолитами, кобальтовое – с марганцевыми минералами и хлоритами. Мощность рудных тел в пластовой части в среднем составляет 8–10 м, в апофизах на глубину до 70 м.

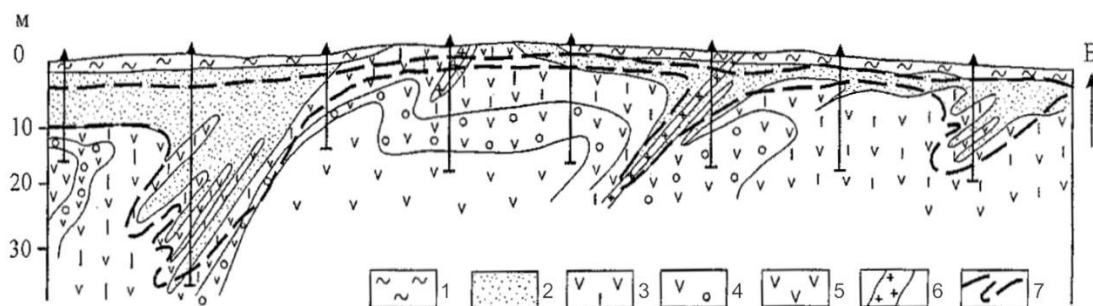


Рис. 5. Разрез рудного участка № 1 Буруктальского месторождения [8]: 1 – покровные суглинки; 2 – охры, интенсивно обохренные кремнистые серпентиниты; 3 – выщелоченные, местами нонтронитизированные и керолитизированные серпентиниты; 4 – карбонатизированные серпентиниты; 5 – слабо измененные серпентиниты; 6 – дайки диоритов; 7 – контур рудного тела.

[Fig. 5. Section of the ore section No. 1 of the Buruktalsky deposit [8]: (1) – cover loams; (2) – ochres, intensely refined silicified serpentinites; (3) – leached, in places non-neutralized and kerolitized serpentinites; (4) – carbonated serpentinites; (5) – slightly modified serpentinites; (6) – dikes of diorites; (7) – contour of the ore body.]

Карстово-площадные месторождения, типичным примером которых является Уфалейская группа (рис. 6) представлены размытым керолито-нонтронито-

охристым профилем. Форма рудных залежей пластовая и линзообразная, осложнённая раздувами и апофизами. При приближении к контактам с вмещающими

форма тел становится неправильной, ветвящейся, со столбообразными раздувами, безрудными окнами, клиновидными апофизами. Месторождения представлены зонами оруденения протяженностью 0,4-2 км, уходящими на глубину 200-400 м. Зоны сложены серийой пластообразных и линзообразных тел длиной 200-400 м при средней мощности 10-20 м.

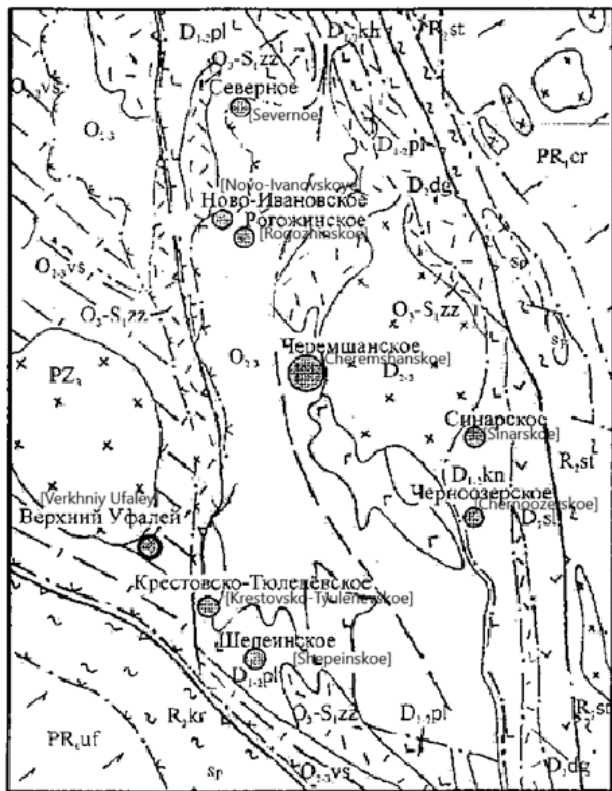


Рис. 6. Обзорная геологическая карта месторождений Уфалейской группы, м-б 1:200000 [8].

[Fig. 6. Overview geological map of the deposits of the Ufaley group, scale 1:200000 [8].]

На *Украине* известны месторождения Побужского района, приуроченные к площадной никеленой КВ небольших гипербазитовых массивов архейского возраста. Рудные залежи с с 0.86–0.98 % Ni и 0.047–0.089 % Co имеют мощность 4–8 м и сложены охристыми, нонтронитовыми и сапонит-керолит-сепентиновыми породами.

В *Сербии* разведаны месторождения Главница и Чикатово. Они представлены линзообразными телами размером 800x400 и 500x200 м. Их средняя мощность 20 м и коэффициент вскрыши 1. Средние содержания Ni 1.4 %, бортовое – 0.8 %. Количества Со колеблется в пределах 0.03–0.1 %, иногда до 0.5 %. В рудных зонах есть линзы опала мощностью в несколько метров.

На территории *Греции* и *Албании* известны осадочные лагунные и озерно-старичные железо-никелевые и никелево-железорудные месторождения, тесно связанные с КВ гипербазитовых массивов. Рудные тела нередко располагаются на различных горизонтах частично эродированной нижнемеловой КВ гипербази-

тов. Железо-никелевые месторождения, сложенные окристо-пелито-оолитовыми рудами с редкими прослоями бобово-конгломератовых разностей, содержат в породах более 35 % Fe, свыше 0.8 % Ni и 0.05–0.08 % Co. В никелево-железорудных месторождениях основным компонентом руд является железо с примесью легирующих никеля и кобальта.

Железо-никелевые месторождения расположены в пределах Албанско-Элленийского пояса гипербазитов. Рудные залежи протягиваются на несколько километров, имеют мощность 6–20 м, содержат 40–55 % железа, 1–1.4 % никеля и 0.05–0.09 % кобальта. Запасы месторождений оцениваются в десятки, реже в первые сотни т, и они рассматриваются как комплексные источники получения железа и никеля. К такому типу относится месторождение Ржаново на территории Югославии. Запасы бобово-конгломеративных никелево-железорудных месторождений исчисляется сотнями миллионов тонн, но низкое качество руд и высокое содержание в них Сг сдерживают их использование. Однако когда количества никеля повышается до 0.4–0.7 %, то они представляют первоочередный интерес. Это месторождения Вардиште и Мокра Гора в Югославии.

Кайнозойские месторождения широко распространены на территориях стран с тропическим климатом. На островах Новой Каледонии, в Меланезии, известны около 1500 месторождений эоценовых никеленосных КВ (рис. 7) на площади более 10 тысяч км². Здесь ежегодно добывается более 3 млн т руды из обогащенных Ni сапролитов (2.5–3%). Запасы Co 900 тыс т при среднем его содержании 0.07 %. В геологическом отношении Новая Каледония представляет фрагмент континентальной коры в составе территории северо-востока Австралии и отделившийся от неё в позднем мелу.

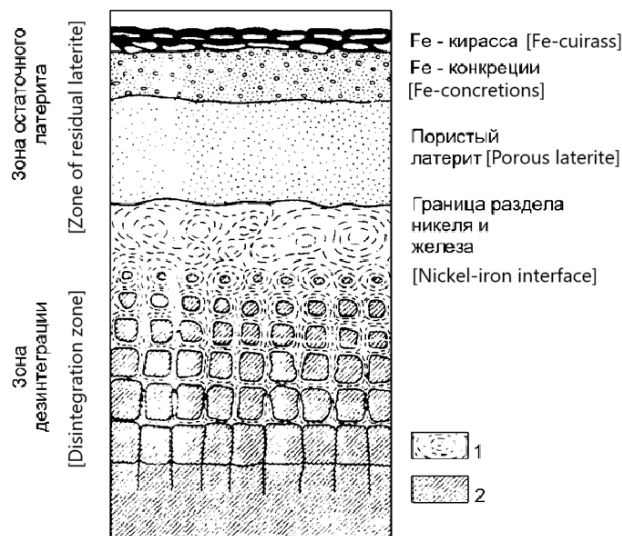


Рис. 7. Типичный профиль эоценовых никеленосных латеритов Новой Каледонии, юго-запад Тихого океана. По Э. де Шателье: 1 – измененные рудоносные серпентиниты зоны дезинтеграции; 2 – неизменные серпентиниты с содержанием Ni 0.25 %.

[Fig. 7. Typical profile of Eocene nickel-bearing laterites of New Caledonia, Southwest Pacific Ocean. By E. de Chatelier: (1) – modified ore-bearing serpentinites of the disintegration zone; (2) – unchanged serpentinites with a Ni content of 0.25 %.]

Месторождения и рудопроявления поля Веда-Бей приурочены к КВ позднемеловых ультрамафитов, преимущественно гарцбургитов (80–90 %), входящих в состав крупного офиолитового комплекса. Они прослеживаются от центральной части о. Хальмахера в восточном направлении через ряд мелких островов почти на 400 км. Коры развиты по аподунитовым серпентинитам офиолитовых массивов, которые занимают 40 % поверхности острова, слагая два пояса. Один протягивается вдоль юго-западного побережья, другой – вдоль северо-восточного. Здесь находится крупнейший в мире массив Дю-Сюд (4950 км²), занимающий всю юго-восточную часть острова. Серпентиниты возникли при воздействии морской воды на минералы горячих интрузивных тел, внедрившихся в меловые отложения. Особенностью таких реакций был небольшой вынос содержащихся в дунитах, в т.ч. и полезных, компонентов.

Типичный профиль латеритного выветривания, приведшего к формированию на поверхности скоплений железистых конкреций-пизолитов показан, на рис. 8.

Запасы богатых руд с содержанием Ni и Co 1–1.5% – около 10 млрд т. Главной рудой на Ni являются выщелоченные серпентиниты. Выражены следующие особенности распределения значительных концентраций Ni и Co: 1 – присутствие качественных руд на *самых* дезинтегрированных *серпентинитах* под латеритами; 2 – самые богатые залежи фиксируются на пологих склонах и в седловинах горных отрогов; 3 – рудные горизонты залегают на глубинах до 50 м. Они содержат 1.5 % Ni и 0.1 % Co; 4 – в основании базальных рудных залежей в трещинных корах с мощностью гарниерит-содержащих пластов 1–2 м концентрации Ni составляют 3–4 %.

В *Индонезии* на острове Сулавеси располагаются крупные месторождения никеля Помалеа, Сороако, Ларона, Колако, на юго-востоке о. Калимантан – месторождение Кукузан, более мелкие – на Моллукских островах и о. Вайгео. Тип месторождений – охристо-сапролитовый (рис. 8), но при отработке первых двух месторождений добывались только гарниерит-серпентинитовые руды, а охристые кобальт-никелевые не использовались. КВ развита по породам дунит-лерцолит-гарцбургитовой ассоциации. Профиль представлен нижней сапролитовой (серпентинитовой) и верхней лимонитовой (латеритной) зонами. Ni концентрируется в сепиолите (3.3 %), серпентине (2.7 %), смектите (1.8 %).

В лимонитовой зоне 90 % никеля связано с гетитом, а 90 % кобальта с марганцевыми минералами. По данным работы [11] одними из крупнейших являются месторождения рудного поля Веда-Бей в центральной части о. Хальмахера на расстоянии 2500 км к востоку от Джакарты и в 50 км к северу от экватора. Площадь рудного поля составляет 120.5 тыс га. Руды приурочены к КВ позднемеловых ультрамафитов крупного офиолитового комплекса. Они прослеживаются от центральной части о. Хальмахера в восточном направлении

через ряд мелких островов почти на 400 км. Выделено четыре рудоносных площади. Тела латеритов прибрежной площади Веда-Бей расположены на высоте 20–450 м над уровнем моря, имеют небольшие размеры, овальную в плане форму. Рудоносные породы площадей Биг-Кахуна, Центральная и Сагеа развиты на платообразных поверхностях с отметками 400–1000 м.

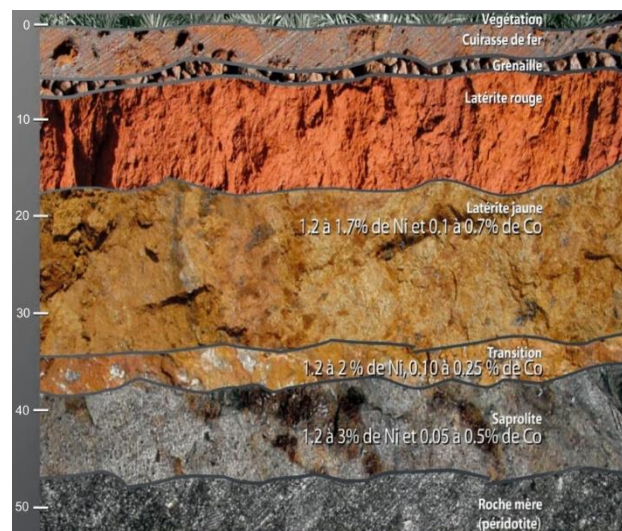


Рис. 8. Кора выветривания перидотита, Макаassar, Индонезия [10].

[Fig. 8. Peridotite weathering crust, Makassar, Indonesia [10].]

Средняя мощность пластообразных рудных тел составляет 10 м, из которых 8 м содержат более 1 % никеля. Самая верхняя железистая часть КВ во многих случаях эродирована, поэтому лимониты с низким содержанием никеля (около 0.8 %) и повышенным содержанием кобальта (0.15–0.18 %) распространены спорадически. Лимониты с содержанием никеля 1–1.4% и кобальта 0.1–0.15 % вниз по разрезу сменяются сапролитами, содержащими от 1.5–1.8 % до 2.5 %, иногда до 4 % никеля. Нижняя часть рудной зоны, представленная останцами коренных пород в сапролитах, характеризуется средними содержаниями этих металлов.

Близкие условия формирования Co-Ni руд на Филиппинах (рис. 9). Поэтому в литературе индонезийские и филиппинские месторождения объединяются в одну Индонезийско-Филиппинскую никеленосную провинцию [12]. В ней разведано более 30 никелевых месторождений с общими запасами (1981) более 400 млн т руды (5900 тысяч т никеля, из них 4800 тысяч т в доказанных запасах руд). Наиболее крупные разрабатываемые месторождения: Суригао (остров Нонок) – разведанные запасы 77 млн т руды при среднем содержании Ni 1.22 %; Сороако (остров Сулавеси) – 180 млн т при среднем содержании Ni 1.8 %; Помалеа (остров Сулавеси) – 45 млн т при среднем содержании Ni 1.5 %.

В *Индии* известно высокопродуктивное месторождение **Сукинда**, в котором никеленосная латеритная КВ развита по дунитам. Она находится в понижении рельефа поверхности выравнивания и перекрыта аллювиальными отложениями, игравшими роль защитного слоя.

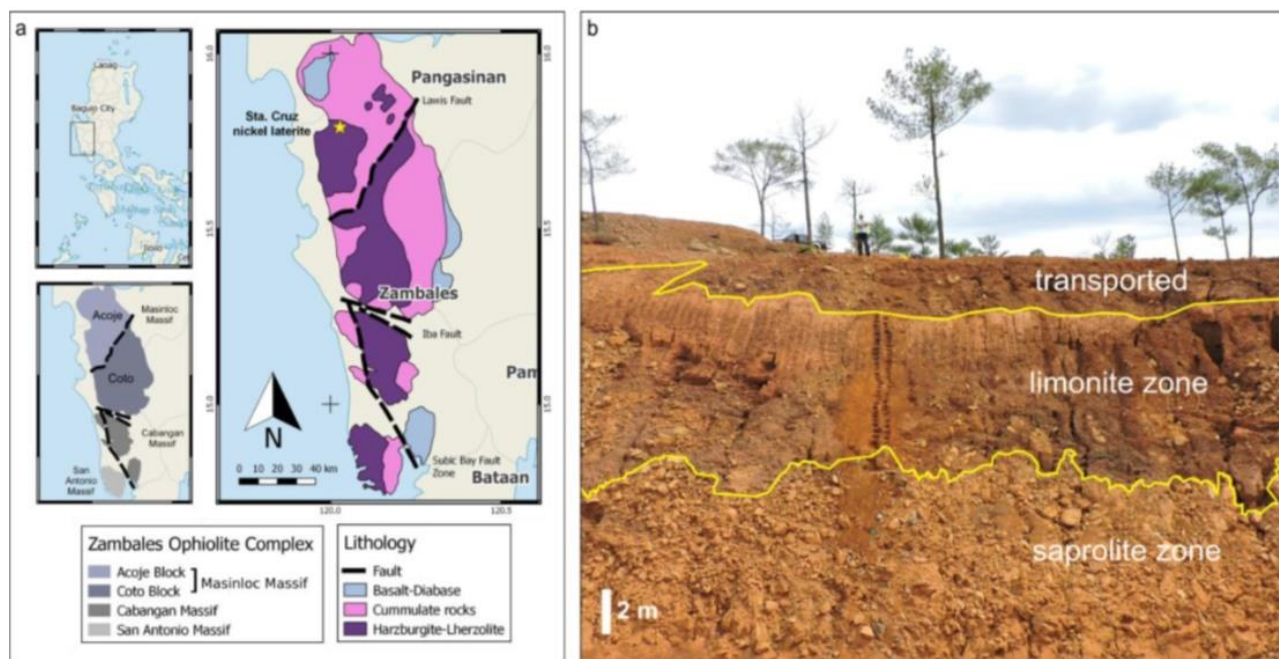


Рис. 9. (а) Расположение исследуемого района. Офиолитовый комплекс Замбалес находится на западе Центральной части острова Лусон, Филиппины. Оно подразделяется на три массива — массивы Масинлок, Кабанган и Сан-Антонио, разделенные границами западно–северо-западного разлома. Массив Масинлок подразделяется на блоки Акое и Кото. Желтой звездочкой обозначено местоположение месторождения никелевых латеритов Sta. Cruz. (б) Фотография исследованного профиля латерита никеля. Зона сапролита перекрыта зоной лимонита. Самый верхний элемент представляет собой слой, перемещаемый механическим способом [13].

Fig. 9. (a) Location of the study area. The Zambales ophiolite complex is located in the west-central part of the island of Luzon, Philippines. It is divided into three massifs — Masinloc, Kabangan and San Antonio massifs, separated by the boundaries of the west–northwest fault. The Masinlock array is divided into Such and Such blocks. A yellow asterisk indicates the location of the Sta. Cruz nickel laterite deposit. (b) A photograph of the studied profile of nickel laterite. The saprolite zone is overlapped by the limonite zone. The uppermost element is a layer moved mechanically [13].

Австралия имеет крупные запасы никелевых руд объемом 4,9–6,0 млн т. В восточной части этой страны имеются месторождения серпентин-охристых руд Гринвейл, серпентиновых – Рокгемтон, охристых – Уингеллина, керолит-нонтронитовых – Ора-Банда. По выплавке никеля Австралия занимает наряду с Канадой, Россией и Новой Каледонией одно из ведущих мест в мире. Никеленосные коры развиты по серпентинитам, реже на коматитовых ультрамафитах – коматититах и дуниитах (Оре-Банда). В латеритной КВ месторождения Грин-Вейл содержания Ni в исходных породах 0,28 % (Co-0,01%), в выветрелых серпентинитах 1,5–1,7 %, в силицитах (ящичные кремнистые руды зон трещиноватости) среди них – до 6 %, в лимонитах – 1,2–1,4%, а Co в последних – 0,5 % при низких его значениях в остальных породах КВ. В самой верхней части элювия – кирасе, сложенной оолитами и пизолитами, содержания Ni и Co невысокие.

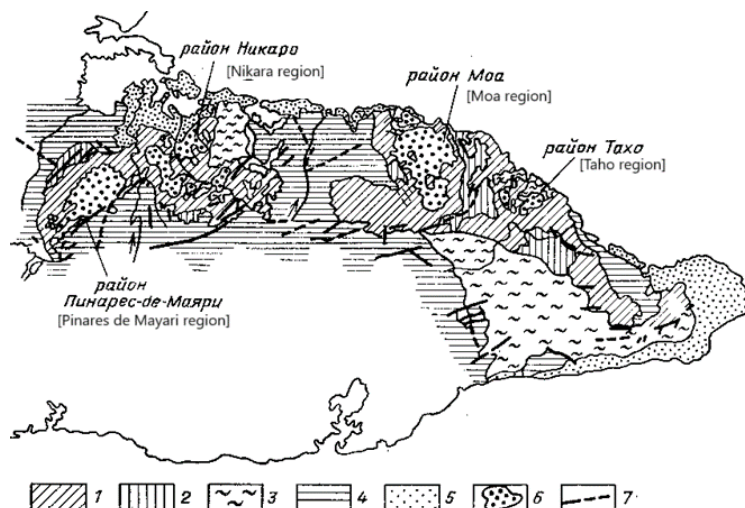
В Бразилии разрабатывается эоценовое месторождение силикатного никеля Сан ду Пьяуи. Отмечается особая роль современных семиаридных климатических условий этой части Южной Америки для выноса Ni из древних кор и концентрации его в молодых аналогичных образованиях. Особенностью месторождений является наличие необычного для тропической зоны серпентин-охристо-«силькретного» профиля никеленосной

КВ [14], особенно хорошо выраженного на месторождении Моро-до-Никель, Никеляндия, Санта-Фе. «Силькрет» сложен массивными кварц-халцедоновыми породами, залегающими в верхней части профиля. Никеленосными являются его охристая и серпентиновая части, но промышленные содержания связаны с обохренными выщелоченными серпентинитами.

Латеритные охристо-глинистые КВ начали формироваться в раннем кайнозое при образовании южно-американской (SA) поверхности выравнивания. В их нижней части в результате замедленного водообмена возник горизонт силифицированных пород. При обновлении рельефа верхняя часть КВ была размыва, а кремнистые породы сыграли роль буфера. В позднем неогене возникла поверхность «Бела», где формировались более молодые КВ, в том числе и под «силькретами». На участках с отсутствием «силькретов» образовались месторождения типа Барро-Альто, в котором на 70 % преобладают серпентин-гарниерит-нонтронитовые руды, меньше приходится на субструктурные охры («желтые латериты») – 20 % и только 10 % – на латериты с железистыми конкрециями в верхней части профиля.

На Кубе рудоносные латериты эоцена, развитые по гипербазитам, прослежены на 800 км и занимают площадь до 5000 км². Основные никелевые месторождения сосредоточены в северо-восточной части провин-

ции Ориенте, тяготеют к приподнятым платообразным поверхностям и обрамляющим их ступенчатым предгорьям. Наиболее крупные месторождения расположены в трех районах, вытянутых относительно друг друга в широтном направлении (рис. 10). А.С Вершинин выделяет четвертый район – Тахо [14]. На западе находится район Пинарес-де-Маяри с корой площадного типа и средней мощностью рудной толщи 7.4 м.



1 – гипербазиты; 2 – габбро; 3 – породы складчатого основания, предшествовавшие внедрению гипербазитов (кристаллические сланцы юры и основные эффузивы раннего мела); 4 – породы синхронные кубинской складчатости: конгломераты, песчаники, туфы, известняки, доломиты, мергели – К₂м; 5 – породы платформенного залегания: мергели, песчаники, глины, аллохтонные латериты – Q; 6 – площади развития никеленосных КВ; 7 – зоны тектонических нарушений.]

В 60 км к востоку от Никаро расположен третий рудный район, включающий месторождения рудного поля Моа с 16 рудоносными участками. Тип КВ линейно-площадной, мощности рудных тел от 7 до 13 м. В целом для группы месторождений Пинарес-Майяра-Моа промышленно ценные руды оконтурены на площади 80 км², их мощность до 18 м, а содержания Ni 2–3 %.

На юго-западе штата Орегон расположено единственное в США месторождение силикатного никеля – Никел-Маунтин. Оно удовлетворяет потребности США в этом металле на 7 %. Разрабатываются латериты КВ по перидотитам, внедрившимся, скорее всего, на рубеже мальма и раннего мела. Латериты развиты на площади несколько более 202 га и имеют среднюю мощность около 15 м при общих их колебаниях от 1.5 до 60 м. Одно из рудных тел совпадает с вершиной горы Никел-Маунтин (а.о. около 1100 м), другое приурочено к террасе на южном склоне.

В Польше к миоценовой КВ на докембрийских серпентинитах древнего офиолитового массива приурочено месторождение Шкляры с залежами никелевых руд, золота и хризопраза [8]. Оно ныне выработано, а небольшой завод вблизи него закрыт. Мощность КВ 20–30 м, по линейным зонам до 100 м. В ней широко развиты окремненные породы, с которыми связаны хризопразовые жилы и прожилки с изумрудно-зеленым опалом. Содержание никеля в КВ серпентинитов (бурых глинах с блоками выветрелых серпентинитов и кремнистых пород) от 0.3 до 5 %.

Здесь выделяются железные латеритные, никелевые латеритные и никелевые серпентиновые типы руд. К востоку расположен второй крупный район Никаро, включающий свыше 10 месторождений. Часть из них отработана, но запасы руд не исчерпаны. КВ здесь линейно-площадные, в них выделяют никелевые плотные, рыхлые серпентиновые (35 %) и охристые (65 %) латеритные руды.

[Рис. 10. Схема размещения КВ в пределах Восточной Кубы. Составлена по материалам геологической службы Республики Куба [14]: 1 – гипербазиты; 2 – габбро; 3 – породы складчатого основания, предшествовавшие внедрению гипербазитов (кристаллические сланцы юры и основные эффузивы раннего мела); 4 – породы синхронные кубинской складчатости: конгломераты, песчаники, туфы, известняки, доломиты, мергели – К₂м; 5 – породы платформенного залегания: мергели, песчаники, глины, аллохтонные латериты – Q; 6 – площади развития никеленосных КВ; 7 – зоны тектонических нарушений.]

[Fig. 10. The layout of the KV within the Eastern Cuba. Compiled according to the materials of the Geological Survey of the Republic of Cuba [14]: (1) – hyperbasites; (2) – gabbro; (3) – folded base rocks that preceded the introduction of hyperbasites (Jurassic crystalline shales and main effusions of the Early

Выводы. Месторождения силикатных никеля и кобальта в большинстве своём тяготеют к КВ кайнозоя на гипербазитах и расположены в зонах тропического климата. Мезозойские никеленосные КВ содержат незначительные запасы этих руд и сосредоточены, в основном, на территории России в пределах Урала и Казахстане.

Месторождения золота

Золото образует концентрации в КВ и связанных с ними континентальными образованиями формации коры выветривания (ФКВ) Сейчас на долю гипергенных месторождений этого металла в КВ приходится заметное количество мировых запасов и ряд крупных месторождений, и она всё время возрастает. По золоту в КВ имеются большое количество публикаций в отечественной, так и зарубежной литературе [15–26] и многие другие работы. В этих работах показано, что золото КВ, ранее не обнаруживаемое горными работами из-за малых размеров его частиц, широко развито в золоторудных районах. Так по данным работы [18], в Бразилии в 1984 г. открыто богатейшее по содержанию Au месторождение Сьерра-Пелада в КВ субвулканических риолитов. В Испании, на месторождении Рио-Тинто, где золото добывалось еще античными римлянами, в 1988 г. разведано 100 т золота КВ по пиритовой залежи. Подобные открытия типичны и для других регионов с вековой добычей металла, где, казалось бы, всё давно известно.

Примеры крупных месторождений золота гипергенного генезиса приведены в табл. 2. Изучение золотоносных КВ на таких месторождениях позволило получить обширную информацию по геологии, минера-

логии, геохимии гипергенного золотого оруденения. Вместе с тем проблемы латерального и возрастного распределения таких КВ в истории Земли во многом остались неосвещенными.

Табл. 2.Примеры месторождений золота формации коры выветривания
[Table 2. Examples of gold deposits of weathering crust formation]

Месторождение, район [Deposit, area]	Запасы золота и его содержания в г/т (в скобках) [Gold reserves and its content in g/t (in brackets)]	Источник [Origin]
Олимпиадинское, Енисейский кряж [Olimpiada, Yenisei Ridge]	Общие запасы Au 750 т, т.ч ¼ от них в КВ (1.76 г/т в первичных рудах, 10.6 г/т в окисленных) [Total Au reserves 750 t, including ¼ of them in weathering crust (1.76 g/t in primary ores, 10.6 g/t in oxidized)]	[27]
Васильковское, Казахстан [Vasilkovskoe, Kazakhstan]	Общие запасы Au 400 т, в том числе 50 т в КВ (2 г/т в первичных рудах, 3.7 г/т в окисленных) [Total Au reserves 400 t, including 50 t in weathering crust (2 g/t in primary ores, 3.7 g/t in oxidized)]	[28]
Светлинское, Челябинская обл. [Svetlinskoe, Chelyabinsk region]	Общие запасы Au около 200 т, в том числе около 1/2 от них в КВ (2.6 г/т в окисленных рудах) [Total Au reserves are about 200 t, including about 1/2 of them in weathering crust (2.6 g/t in oxidized ores)]	[27]
Воронцовское, Свердловская обл. [Vorontsovskoye, Sverdlovsk region]	Общие запасы Au 75 т, в том числе 1/3 от них в КВ (4.9 г/т в первичных рудах, 7.5 г/т в окисленных) [Total Au reserves 75 t, including 1/3 of them in weathering crust (4.9 g/t in primary ores, 7.5 g/t in oxidized)]	[27]
Боддингтон, Западная Австралия [Boddington, Western Australia]	115 т в латеритной КВ (2.9 г/т) [115 t in lateritic weathering crust (2.9 g/t)]	[17]
Бронзевинг, Западная Австралия [Bronzewing, Western Australia]	94 т в латеритной КВ (4.6 г/т) [94 t in lateritic weathering crust (4.6 g/t)]	[17]
Каноуна Бил, Западная Австралия [Kanoona Beale, Western Australia]	76 т в латеритной КВ (5.3 г/т) [76 t in lateritic weathering crust (5.3 g/t)]	[17]

Необходимым условием накопления золота в КВ являются его повышенные (не менее 100 кларков) содержания в материнских породах. Важными факторами также являются наличие эпох корообразования, приуроченных к континентальным перерывам и планациям рельефа, неперенное участие органики в процессах выветривания. Материнский субстрат может быть рудами и проявлениями золота в эндогенных, осадочных и метаморфогенно-осадочных породах. Над эндогенными рудами при выветривании образуются «железные шляпы» с повышенными содержаниями Au по сравнению с таковыми в рудах. Эти КВ давно известны, хорошо изучены, разрабатываются совместно с коренными рудами.

Золоторудные железные шляпы формируются на сульфидных месторождениях. Так на Гайском медно-цинково-колчеданном месторождении КВ состоит из трёх зон (снизу вверх): 1 – дресвяно-щебнистой вторичного обогащения, переходящей вниз в материнские породы – сульфидные руды; 2 – каолинит-иллитовой и иллитовой, выщелачивания; 3 – охристо-каолиновой или гидрослюдисто-каолининовой окисления [29]. В первичных рудах и породах зоны вторичного сульфид-

ного обогащения золота и серебра 0.9–2 г/т. В основании верхней зоны, состоящей из бурых железняков (50–60 м), и породах кварц-ярозитовой (15 м) подзоны, а также на границе с зоной выщелачивания содержания Au поднимаются до 74 г/т, Ag – до 600 г/т. В зоне выщелачивания (10–15 м) Au 2.2 г/т, Ag 12 г/т. В целом же в железных шляпах накапливаются Ag, Au, Pb, Ba, Cu, Hg, Mo. При этом концентрации этих элементов возрастают в 100–1000 раз.

В КВ пород, обычно алюмосиликатных с малыми количествами золота, его содержания возрастают и могут стать промышленными. Элювий и образования его ближайшего перемива (делювий, пролювий, аллювий), слагающие формацию коры выветривания (ФКВ), сложены различными типами пород – щебенисто-песчано-глинистыми, глинистыми, латеритами. Они отражают различную степень выветрелости исходного субстрата и обогатимость золотом. Алюмосиликатные породы могут содержать промышленные количества золота – Сухоложское, Олимпиадинское и другие месторождения. В таких случаях его запасы в КВ повышаются.

В истории Земли были эпохи, когда на территориях

крупных регионов формировались мощные КВ, содержащие многие полезные компоненты, том числе и золото. Это времена континентальных перерывов, планации рельефа, благоприятных условий с теплым гумидным климатом, обилием осадков и сохранностью выветрелых образований. Такие эпохи рассмотрены В. П. Петровым [30] и А. Д. Савко с соавторами [3].

Наиболее мощные и проработанные КВ появились при выходе на сушу биоса. С этого времени процессы химического выветривания сменились биохимическими процессами. Появился даже термин «биогенное» золото, которое образуется при участии организмов, среди которых ведущую роль играют бактерии. Этому золоту посвящено большое количество публикаций [18, 22, 24, 25, 31–37 и другие].

КВ по образному выражению Б. М. Осовецкого [38] являются «природными фабриками», где совершается процесс высвобождения наночастиц золота из минералов-концентраторов в свободном виде, появляются на месторождениях и рудопрооявлениях ряда формаций (золото-сульфидно-кварцевой, сульфидно-кварцевой, полиметаллической и других). Указывают на процессы физического ультрадиспергирования пород в КВ. Еще большую роль играют процессы биохимического разложения железистых сульфидов с их преобразованием в гидроксиды железа и освобождением наночастиц Au. Последние в дальнейшем активно участвуют в экзогенных процессах в КВ (осаждение на поверхности минералов, миграция в коллоидных или истинных растворах, агрегация и др.). В гипергенных условиях происходило укрупнение размеров зерен остаточного Au, вынос из них других элементов и повышение его содержания (рис.11).



Рис. 11. Гипергенное золото из россыпи Гаран, Гвинея. Строение зерна остаточного Au с высокопробной каймой и прожилками по трещинам (увел. 150) [39].

[Fig. 11. Hypergene gold from the Garan placer, Guinea. Structure of residual Au grain with high-fineness rim and veins along cracks (magnification 150) [39].]

В эпохи мощного корообразования аккумулировались многие полезные ископаемые, в том числе золото. Обычно это происходило во время планации

обширных территорий. В раннем палеозое (каледонский этап) это ордовикское время, в позднем - раннекарбоновое - раннепермское (герцинский этап). В мезозое такими эпохами были поздний триас-ранняя юра (раннекемерийский) и ранний мел (позднекиммерийский этапы). В кайнозое отмечается 2 уровня развития КВ граница мела и палеогена и эоценовый. На самом деле картина сложнее. Так континентальный перерыв и благоприятные условия для образования КВ в отдельные эпохи могли выходить далеко за пределы указанных выше временных интервалов. Но общая тенденция такой приуроченности к определенным эпохам сохраняется.

Палеозойские месторождения золота КВ крайне редки, обычно приурочены к линейно-трещинным и контактно-карстовым зонам и имеют щебнисто-глинистый состав. Примером может служить Каталамбинское месторождение на Полярном Урале, где золото, приурочено к нижнепалеозойским КВ на кварцево-мусковитовых сланцах. По данным работы [40] в материнских породах оруденение представлено малосульфидными золото-кварцевыми жилами. В КВ установлено лишь две зоны – дезинтеграции и выщелачивания. Последняя сложена сланцами с примесью каолинита, а в верхней ее части появляется заметно каолинизированный частично обохренный горизонт. Повышение содержания Au отмечается в верхней части зоны выщелачивания (4-8 г/т против 0.2 г/т в исходном субстрате), где заметно увеличение доли каолинита. Золото ультратонкое (рис. 12), содержит примеси As, Te, Pt, а также Hg. Наличие последней может свидетельствовать о возможном эксгальационном генезисе части золота, как это показано в работах [42, 43].

Мезозойские месторождения довольно широко развиты на Урале, в южной части Западной Сибири, Казахстане, в Амурской области и Китае. Золотоносные КВ приурочены, как показано выше, к двум возрастным уровням – T_3-J_1 и K_1 . Но на участках суши, не подвергшихся трансгрессиям морей, выветривание горных пород могло происходить и в более длительные сроки вплоть до палеогена. Особенностью мезозойских КВ по сравнению с палеозойскими является наличие зоны гидролиза в профиле выветривания и иллит-каолинитовый или охристо-каолинитовый состав. Т.е. они более проработаны, а содержание Au в них обычно выше, чем в палеозойских КВ.

Золотоносные КВ имеют сложное строение, обычно тяготеют к карстовым областям, зонам тектонических нарушений или контактам разных по составу пород. Золото фиксируется по всему разрезу КВ, но его больше в глинистых породах. Обогащенные интервалы с содержаниями до первых г/т отмечены на разных глубинах и особенно в приповерхностной зоне мощностью до 10–16 м. Разнообразная морфология частиц золота (рис. 13) свидетельствует о наличии не только остаточного эндогенного Au, но вновь образованного гипергенного за счет разложения материнских пород с золотосодержащими минералами.

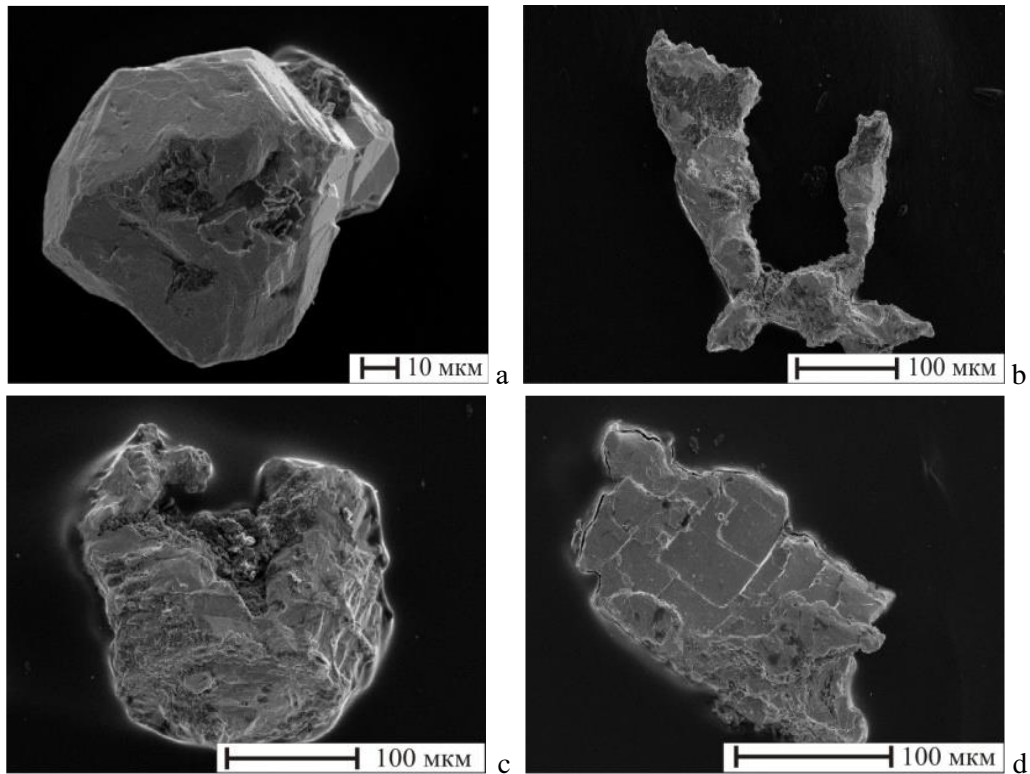


Рис. 12. Морфология золота КВ хребта Манитанырд, Полярный Урал: *a* – кристалл, *b* — дендритоид, *c* – комковидная, *d* – пластинчатая. [41].

[**Fig. 12.** Morphology of gold in the HF Manitynyrd ridge, Polar Urals: (*a*) – crystal, (*b*) – dendritoid, (*c*) – lump-like, (*d*) – lamellar. [41].]

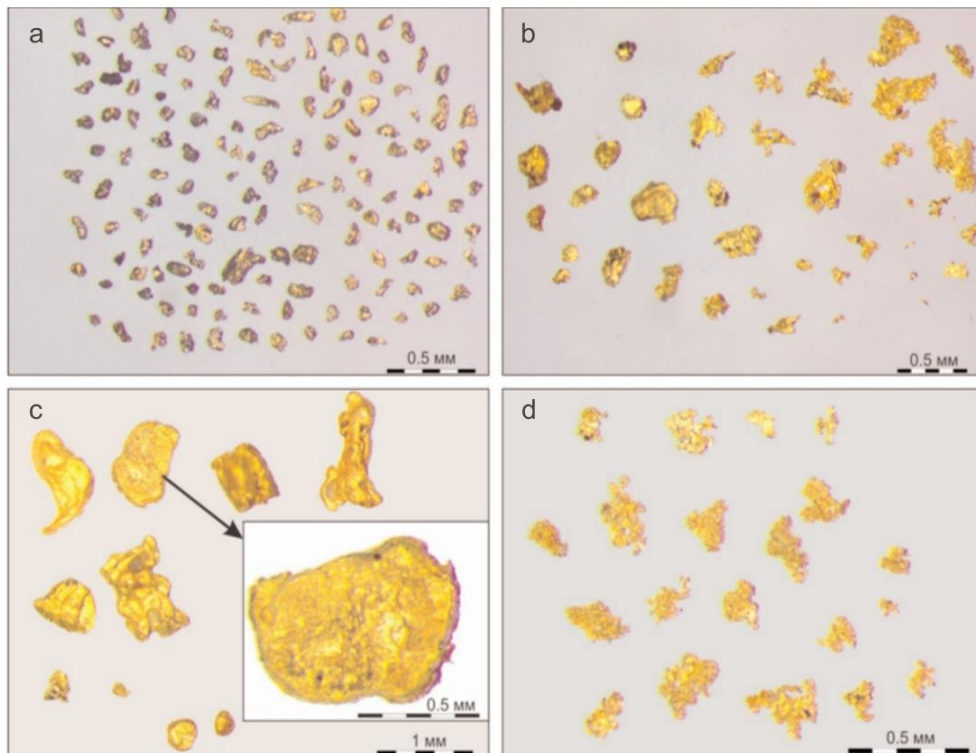


Рис. 13. Морфологические типы золотин КВ пород палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья: *a* – идиоморфного типа из остаточной КВ: проволоочные, ленточные, пластинчатые, плохоограненные; *b* – гемиидиоморфные зерна с отростками, интерстициальные выделения золота с блестящими отпечатками вмещающих минералов, ажурные цементационные золотины из остаточной КВ; *c* – золото из перекристаллизованной КВ различной степени окатанности, иногда с корочкой новообразованного золота; *d* – интерстициальные выделения с блестящими отпечатками вмещающих минералов, ажурные цементационные золотины из перекристаллизованной КВ [44].

[Fig. 13. Morphological types of goldenrods of the rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yay interfluvium: (a) – idiomorphic type from the residual weathering crust: wire, flax, lamellar, poorly cut; (b) – hemidiomorphic grains with outgrowths, interstitial gold deposits with shiny imprints of host minerals, openwork cementation goldenrods from the residual crust weathering; (c) – gold from redeposited weathering crust of varying degrees of edging, sometimes with a crust of newly formed gold; (d) – interstitial gold deposits with shiny imprints of host minerals, openwork cementation gold from redeposited weathering crust [44].]

В работе [45] на примере Среднего Урала рассмотрен механизм накопления свободного Au в верхних горизонтах мезозойской КВ в пределах пенепленизированных водоразделов. Сущность суффозионно-гравитационной модели этого автора сводится к тому, что в мезозое на пенепленизированных участках развития эндогенного золотого оруденения, отвечающих рангу россыпеобразующих рудных формаций (золото-кварцевой, золото-сульфидно-кварцевой, золото-сульфидной, золото-скарновой и иных), проявился эффект проецирования высвободившихся при выветривании частиц свободного Au, характеризующейся повышенной гидравлической плотностью.

При плоскостном вымывании глинистых частиц (процессах суффозии) в условиях слабо пересеченного рельефа золотины проецировались в зоне развития элювия. Это приводило к формированию своеобразных «плащеобразных» залежей в верхних горизонтах химических КВ, получивших у старателей название «верховиков». Золотины при такой вертикальной просадке приобретают черты псевдоокатанности. При последующем размыве водораздельных плащеобразных накоплений золота в верховьях логов (их «головке», вблизи рудных выходов) уже появляются окатанные золотины. Примером такого генетического типа может служить Верхотурский участок, а также юго-восточная часть Айдерлинского рудного

поля, Синешиханское рудное поле.

Как пишет А. Г. Баранников [45], одновременно с формированием химических КВ происходило образование карста (рис. 14), куда поступали размываемые выветрелые породы. При неоднократном подновлении карста золотосодержащие отложения подвергались деформациям, обрушению, что в ряде случаев приводило к возникновению так называемых косых «пластов», которые нередко отличаются большими содержаниями металла. С КВ связаны мезозойские аллювиальные и делювиально-аллювиальные россыпи в эрозионно-структурных депрессиях, образовавшиеся при масштабной пенепленизации. Огромные объемы Au-содержащих пород, испытавших химическое выветривание, оказались вовлеченными в сферу россыпеобразования, что способствовало формированию высокопродуктивных россыпей в юрское и меловое время. Наиболее крупными месторождениями этого типа (до 1–3, редко 5 т и более) являются: на Северном Урале – россыпи Екатерининской площади, Белужская, Чапинская, Масловская, Чернореченская, Ларьковская и другие; на Среднем Урале – Невьянского района, Висимской группы, Серебряная россыпь, Синарская группа, Мраморско-Кособродской полосы; на Южном Урале – россыпи Качкарской группы, Зоинско-Ильинская, Черноборская, Александровская, Казанская и другие.

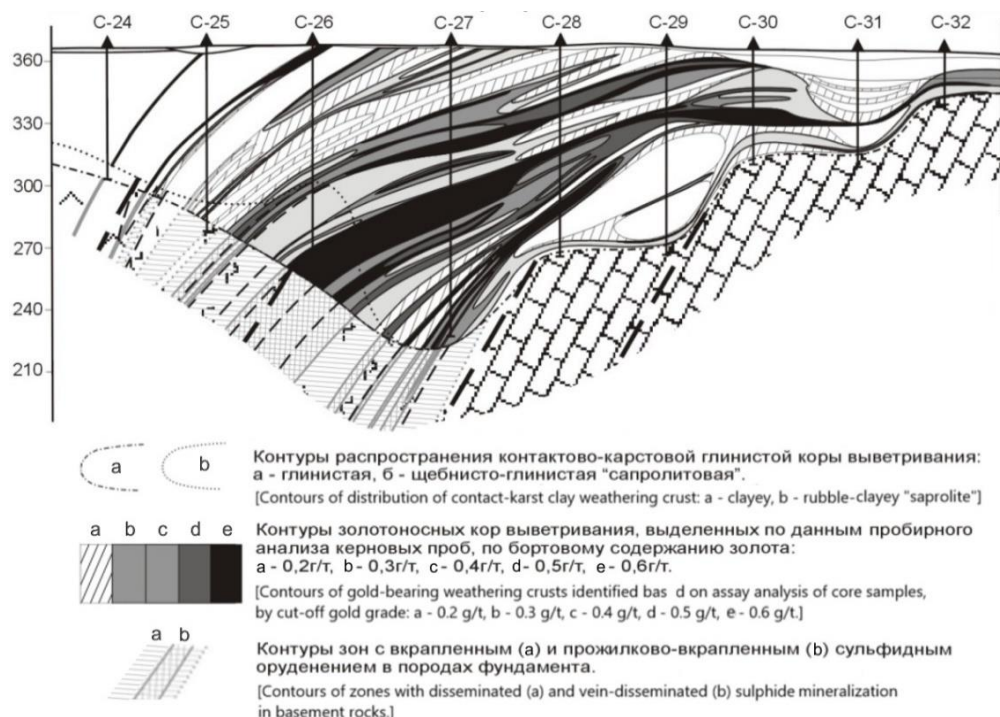


Рис. 14. Распределения Au в вертикальном разрезе залежи золотосодержащих КВ Июньского месторождения [45].

[Fig. 14. Distribution of gold in the vertical section of the deposits of gold-bearing weathering crusts of the June deposit [45]]

На Березовском месторождении золота, самом крупном на Урале, КВ мощностью до 40–60, по линейным зонам до 120 м, представляет зону окисления. В ней содержания благородного металла возрастают, составляя 2–3.5 г/т. Площадь зоны гипергенеза около 60 км², и значительная часть золота была добыта из неё. К менее крупным месторождениям относятся Гагарское, Сусанское и Шульгинское. В мощной площадной КВ (40–80 м) метасоматитов Воронцовского месторождения золота до 2.5–3.5 г/т. На месторождениях Долгомысовском и Крылатовско-Чесноковском с золото-кварцевым оруденением в кварц-серицит-хлоритовых и кварц-хлоритовых метасоматитах в линейно-трещинных, реже линейно-площадных КВ золота от 0.5 до 10 г/т.

На Южном Урале имеется **Светлинское** месторождение, приуроченное к мезозойской КВ. Её материнскими породами являются мраморы, кварц-мусковитовые, кварц-серицитовые сланцы. Содержащие пирит-пирротинное с халькопиритом стратиформное и жильное пирит-халькопирит-пирротин-кварцевое оруденение КВ признаны контактово-карстовыми. Профиль КВ неполный иллит-каолинит-охристый. Зона дезинтеграции сланцев сверху сменяется зоной выщелоченных иллит-каолинитовых пород (горизонты белых и серых глин), охристо-каолиновой (желтых и бурых глин) и, наконец, зоной гетит-гематитовых охр. Повышенные содержания Au в низах охристо-каолиновой зоны (2.4 г/т) и в зоне охр (3.3 г/т). На нижнем уровне отложение Au происходило на слабо восстановительном, на верхнем – окислительном барьерах.

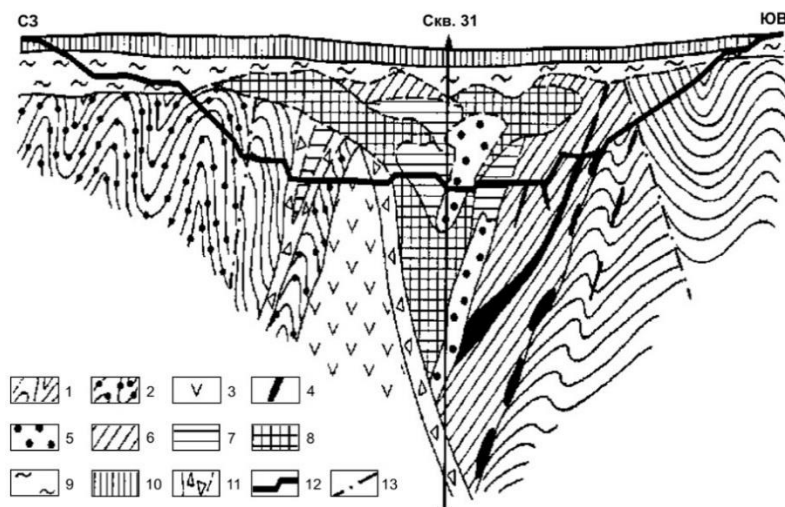
В *Северном Казахстане* развиты аккумуляции Au в КВ по различным породам, содержащим золото-сульфидные минерализованные зоны. К элювию на черных сланцах приурочены месторождения Бакырчик, Боко, Аджал и другие, на карбонатно-терригенных породах – Суздальское, Джерек, Мираж, на гранитоидах – Васильковское, Акбакай.

В *Амурской области* на золоторудных месторождениях в линейно-площадных КВ мощностью от первых

до 150 м содержание Au возрастает и увеличивается его пробность. Так, на Покровском месторождении в верхней части КВ («железная шляпа») количества золота (г/т) достигают 98 на Рыбкинском – 67.6, Куликан – 68.3, Чагоянском – 124, Кировском – нескольких кг/т, Золотая Гора – до 20 кг/т. КВ служат источником питания Au для россыпных узлов с россыпями разных морфологических типов (элювиальных, ложковых, террасовых и глубоко погребенных).

На крупном *Олимпиадинском* сульфидном месторождении Красноярского края линейная КВ кварц-карбонат-слюдистых сланцев представлена столбообразными и линзообразными залежами глубиной до 400 м. Она сложена глинисто-алевритовыми образованиями иллит-каолинит-кварцевого состава с примесью гидроокислов железа и марганца. В материнском субстрате основная масса золота (2.8 г/т) представлена пылевидными и дисперсными частицами, и рассредоточена в большом объеме метасоматических пород. В КВ количество Au увеличивается в 2–3 раза по сравнению с содержанием его в коренных породах и составляет 10–20 г/т.

На юге Сибири в работе [18] описаны месторождения мел-палеогеновых золотоносных КВ, в том Егорьевское, Апрельское и Христиновская Яма. Первое из них, открытое в 1985 г., представлено иллит-каолинитовым элювием по сульфидизированным двуслюдистым метасоматитам с кварцевыми малосульфидными жилами и прожилками в поле развития известняков и диорит-диабазовых даек. Средняя мощность рудных тел на выявленных 11-ти участках от 2 до 12 м, Au от 0.144 до 0.925 г/м³. Апрельское месторождение открыто в разрабатываемом на огнеупорные глины карьере (рис.15). Там в КВ линейно-карстового типа мощностью до 150 м в красноцветных элювиальных глинах, бурых железняках и реликтах кварцевых золота до 10 г/т. Месторождение Христиновская Яма, разрабатываемое как элювиальная россыпь, приурочено к карсту на тектоническом контакте карбонатных отложений и алюмосиликатных пород.



– weathered, (1) – quartz-sericite shales, (2) – carbonaceous shales, (3) – acid effusions and their tuffs, (4) – deposits of brown ironstone; (5–9) – clays: (5) – red-colored bauxite-bearing, (6) – red-colored, (7) – white kaolin substandard, (8) – white kaolin refractory, (9) – kaolin local redeposition, (10) – allochthonous loess-like loams; (11) – crushing zones; (12) – contour of the quarry bottom; (13) – tectonic disturbances.]

Рис. 15. Геологический разрез золотоносной КВ Апрельского месторождения огнеупорных глин, Салаир [18]. Сапролиты по исходным породам печеркинской свиты (Є_{1р}): 1–3 – выветрелые 1 – кварц-серицитовые сланцы, 2 – углистые сланцы, 3 – кислые эффузивы и их туфы, 4 – залежи бурых железняков; 5–9 – глины: 5 – красноцветные бокситоносные, 6 – красноцветные, 7 – белые каолиновые некондиционные, 8 – белые каолиновые огнеупорные, 9 – каолиновые местного переотложения, 10 – аллохтонные лесовидные суглинки; 11 – зоны дробления; 12 – контур дна карьера; 13 – тектонические нарушения.

[Fig. 15. Geological section of the gold-bearing KV of the April refractory clay deposit, Salair [18]. Saprolites according to the initial rocks of the Pecherkin formation (Є_{1р}): (1–3)

Рассматриваемый тип концентраций золота широко проявлен вдоль всего внешнего пояса Западной и Восточной Сибири. Там золотосные отложения приурочены к образованиям перемыва вещества КВ в многочисленные эрозионно-структурные депрессии.

На Мурзинском месторождении, расположенном в северо-западной части Алтая, отмечается ассоциация золота с железо-марганцевыми шляпами в зонах окисления золото-сульфидно-скарнового и золото-кварцевого оруденения. На месторождении развита линейная КВ шириной в 100 м, прослеженная по простиранию на 1200 и глубину до 150–180 м. Элювий представлен белыми смектит-каолиновыми, красноцветными

гетит-каолиновыми и темно-серыми псилломелан-каолиновыми глинами. Наибольшие средние содержания (2.5 г/м^3) приурочены к максимально марганцевосодержащему элювию.

Кайнозойские месторождения Их абсолютное большинство открыто в последние четверть века в тропических странах – Австралии, Бразилии, Венесуэле, Индии, Вьетнаме, Африке, Папуа-Новой Гвинее, Французской Гвиане, где широко развиты золотосные латериты (рис. 16). Открыты месторождения Au в КВ с каолиновым профилем в США, Украине, Казахстане, России и других странах.

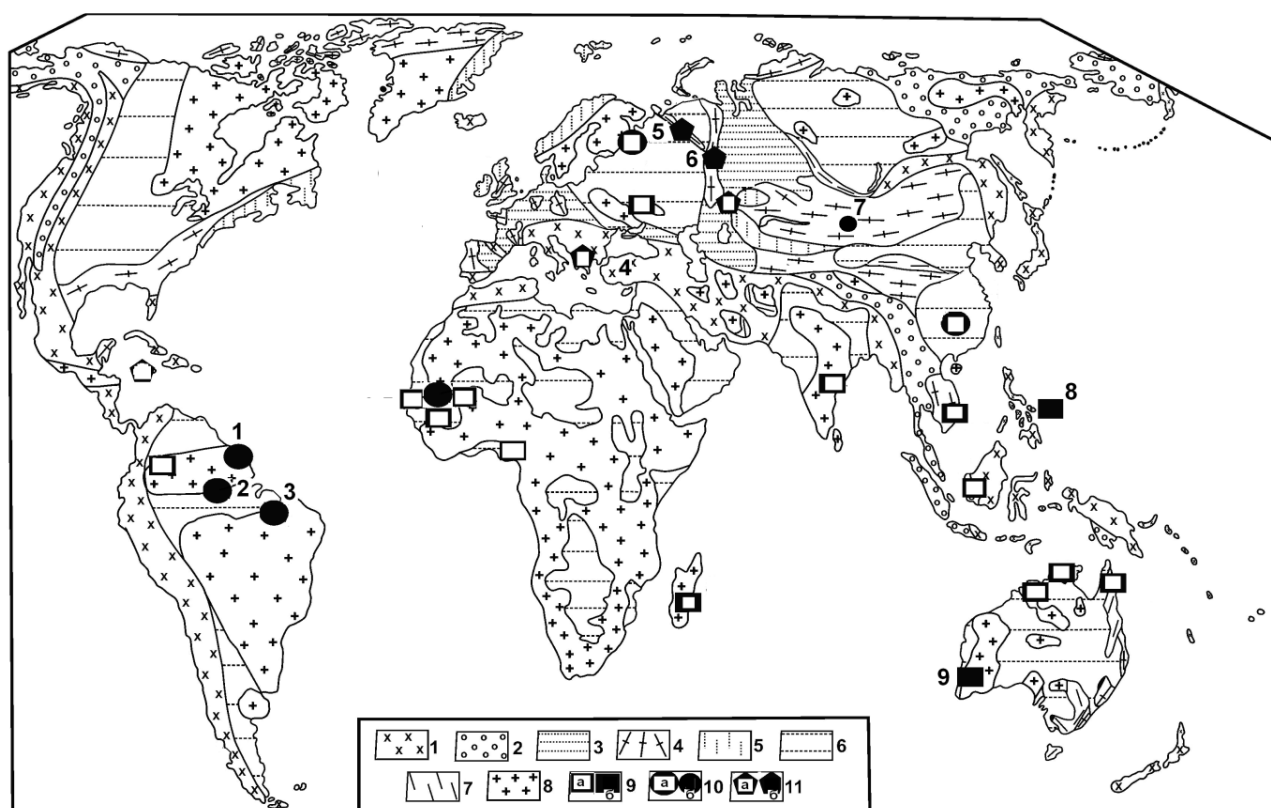


Рис. 16. Схематическая карта распространения золотосных бокситов: 1, 2, 4, 5, 7 – складчатые области; 1 – альпийские; 2 – мезозойские; 4 – герцинские; 5 – каледонские; 7 – байкальские; 3 – молодые платформы; 6 – древние платформы; 8 – древние щиты; 9–11 – главные генетические типы бокситов: 9 – латеритный; 10 – осадочный; 11 – карстовый (а – обычные; б – золотосные). 1–9 – районы месторождений золотосных бокситов (1 – Приморский Ю. Америк; 2 – Тромбетос; 3 – Парагоминас; 4 – Мендерес; 5 – Среднетиманский; 6 – Североуральский; 7 – Барзасский; 8 – Филиппинский; 9 – Боддингтон, Австралия. По [46].

[Fig. 16. Schematic map of the distribution of gold-bearing bauxites: (1, 2, 4, 5, 7) – folded regions; (1) – Alpine; (2) – Mesozoic; (4) – Hercynian; (5) – KaleDon; (7) – Baikal; (3) – young platforms; (6) – ancient platforms; (8) – ancient shields; (9–11) – the main genetic types of bauxite: (9) – laterite; (10) – sedimentary; (11) – karst ((a) – ordinary; (b) – gold-bearing). (1–9) – areas of gold-bearing bauxite deposits ((1) – Primorskiy Yu. American; (2) – Trombetos; (3) – Paragominas; (4) – Menderes; (5) – Srednetimansky; (6) – Severouralsky; (7) – Barzassiy; (8) – Filipino; (9) – Boddington, Australia. According. To [46].]

В Бразилии месторождение Бания, округ Каражас, представляет собой мощный (30–300 м) латеритный покров над сульфидизированными золотосными хлоритовыми сланцами. В верхней части КВ многочисленные железистые конкреции. Они содержат мелкие, (менее 1 мм) колломорфные и дендритовидные выделения электрума (21.37 % Au, до 1.04 % Hg, до 0.41 Cu, до 0.08 % Pt). С глубиной пробыность золотин возрастает. На месторождении Салобу, штат Параиба,

обогащены золотом КВ в зоне шарьяжа. Латериты и подстилающие окварцеванные сульфидизированные сланцы содержат 5 г/т металла. В этой стране известны латеритные месторождения золота Мара Роза, Фазенда Нова, Сьерра Пеллада, и другие. Кроме того, в Южной Америке месторождения такого генезиса находятся в Венесуэле, Никарагуа, Гайане. В Суринаме широким распространением пользуются КВ с содержанием Au до 18–70 г/т.

В Южной Америке давно отрабатываются месторождения золотоносных бокситов Омаи (Гайана) и Роусбел и другие (Суринам). Первое – карьером (рис. 17) глубиной 20 м. Средние содержания Au в обоих до 10 и более г/т. В КВ по золотоносным березитам



Рис. 17. Фото золоторудного карьера месторождения Омаи с золотоносными бокситами в верхней части (красновато-бурая зона), Гвианский щит, Гайана [46].

[Fig. 17. Photo of the Omai gold mine with gold-bearing bauxites in the upper part (reddish-brown zone), Guiana Shield, Guyana [46].]

В Африке латеритные коры выветривания, железные шляпы на коренных жильных месторождениях с высоким содержанием золота распространены во многих районах континента. В.М. Чайка [47] составил их описания для Центральной Сахары (массив Ахаггар и примыкающие площади), известны они и в Южной Африке. В зоне выщелачивания карбонатов и сульфидов рудных жил содержания Au доходят до 70 г/т. На подобном месторождении Тиририн, Алжир, мощности зоны окисления с богатым золотом достигает 100–200 м. Пустоты выщелачивания его жил заполнены гидроокислами железа, марганца и содержат дендритовидные выделения высокопробного металла. Блоки до указанных глубин содержат 50–70 г/т металла. За пределами зоны окисления содержания золота резко меньшие, не больше 2–5 г/т.

В Судане (Красноморская зона) описаны золотоносные латериты, развитые по залежам хромитов месторождения Хассаи. В Уганде марганцевистые золотоносные конкреции образуют в латеритах хорошо выраженные слои мощностью до 0.5 м на глубине до 1.5 м. В них обнаружено до 150 г/т золота, а также 0.08 % вольфрама, до 0.25 % меди, иногда более 3 % свинца [27].

В Австралии, особенно в её юго-западной части (рис. 18), в железных латеритных шляпах многих месторождений обнаружены высокие содержания благородных металлов. В КВ архейского месторождения Калгурли и расположенных рядом месторождениях Маунт-Перси и Кэноуна содержалось до 35 г/т золота. Ресурсы золотоносных руд в латеритной коре (от 10 до 110, в среднем 35 м) месторождения Боддингтон, которое разрабатывалось ранее как бокситовое, 115 т. Среднее содержания Au здесь 1.8 г/т, бортовое – 1.0 г/т. Здесь выделяется 3 золотоносных горизонта. Верхний локализован в латеритном покрове и связан с железис-

тым латеритом и низами твердой корки, представленной окварцованными и бокситоносными глинами; средний приурочен к кровле ожелезненных каолинистых глин, где рудные тела представляют серию субгоризонтальных линз, отождествляемых с палеуровнями грунтовых вод; верхний – к границе глинистого горизонта и сапролитов.

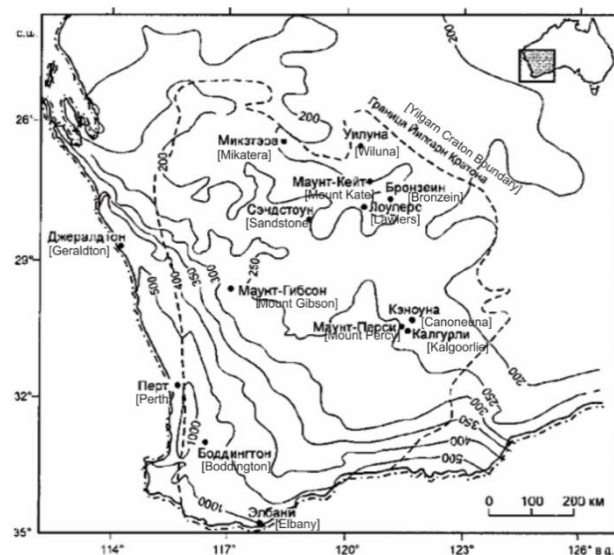


Рис. 18. Обзорная схема расположения латеритных месторождений золота Западной Австралии [18].

[Fig. 18. Overview of the location of laterite gold deposits in Western Australia [18].]

Центром золотодобычи является район месторождения Лоулерс с расположенными поблизости месторождениями Бронзеин, Маунт-Кейти Сэндстоун, где промышленная золотоносность связана с латеритами

по зеленосланцевым и метабазитовым породам. Содержания гипергенного золота в виде тонких частиц в трещинках и дендритов на поверхности гетита достигают 9 г/т. На месторождении Бронзевинг (85 т) золото со средним содержанием 4.6 г/т в КВ мощностью 90–120 м концентрируется в двух горизонтах – сапропелите и латерите, разделенных зоной «истощенных глин»

Материнскими для КВ являются архейские зеленосланцевые формации, состоящие из кислых и основных вулканитов со штоками диоритов и содержащие убогую Au-Cu-Mo-W минерализацию, где количества Au составляет 0.05–0.1 г/т. Снизу вверх выделяется четыре зоны: 1 – сапролитовая (5–40 м) – каолинит-монтмориллонит-иллит-хлоритовая порода; 2 – пестроцветных глин (10–100 м) – каолинит-кварц-гетит-гематит-мусковит-гипс-иллитовая порода; 3 – ожелезнения (4–15 м) внизу горизонты твердая шляпа – гипс-гематит-гетит-каолиновая порода с пизолитами гетита и лимонита; 4 – покровный горизонт (до 20 м), сложенный гипс-гетит-гематитовой породой, представленный несцементированными пизолитами гидрооксидов железа и алюминия с песчаным наполнителем. Повышенные содержания золота приурочены к зоне 3, к верхней и нижней частям зоны 2. Такие же по генезису в этой стране месторождения Западной Австралии Маунт-Гибсон, Глессон, Буллабулинг. Зона окисления месторождения Брокен-Хилл имела мощность до 75 м и разрабатывалась из-за высокой сереброносности (до 9.5 кг/т Ag). В железной шляпе Елура – 3.1 кг/т Ag и 9 г/т Au.

Выводы. Необходимым условием накопления золота в КВ являются его повышенные (не менее 100 кларков) содержания в материнских породах. Весьма благоприятны для образования месторождений линейные и контактно-карстовые зоны. Первые редкие аккумуляции Au в КВ известны в палеозое. В мезозойское время их количество резко возросло. В них золото могло накапливаться во всех зонах профиля выветривания, но наибольшие содержания приурочены к иллит-каолинитовым глинам зоны гидролиза. Основное же количество месторождений и запасов металла сосредоточено в латеритных КВ кайнозоя тропических стран. Оно концентрируется в сапролите, литомарже и кирасе латерита, а наибольшие его содержания тяготеют к верхней части профиля выветривания. Золото может накапливаться при формировании бокситов. Такие месторождения часто являются комплексными золото-глиноземными.

Месторождения редких металлов

По информации на сегодняшний день, наибольшими запасами РМ обладает Китай – 44 млн т. На второе место с 22 млн т вышел Вьетнам, бурными темпами развивающий производство этого вида минерального сырья. Третье-четвертое место делят Бразилия и Россия – по 21 млн т, на пятом США с 2.4 млн т. Но данных по запасам РМ в КВ нет.

Палеозойские месторождения РМ известны в КВ на карбонатах. Так в пределах Анабарского щита

большой интерес представляет рудный район Восточно-Прианабарской провинции Якутии (рис. 19, 20). На этой территории еще в конце протерозоя (0.9–0.6 млн лет, поздний рифей-венд) внедрились тела нефелин-кальцикатовых карбонатитов массива Томтор. По данным работ [50, 51] его центральное ядро сложено карбонатитами, а ультрамафиты и фойдолиты образуют вокруг них неполное кольцо. Внешняя часть массива представлена щелочными и нефелиновыми сиенитами. По всем породам развита КВ, наиболее мощная по карбонатитам, обогащенным фосфатами и редкоземельными элементами. С КВ связано одноименное редкометалльно-скандий-ниобиевое месторождение, возможно, крупнейшее в мире по запасам целого ряда полезных компонентов. Однако наиболее ценная их часть сконцентрирована не в древних магматитах, а в поздних образованиях перемыва (древние ложковые россыпи) каменноугольно-пермской КВ по этим породам. Ее состав франколит-гидрогетитовый, а мощность 100–400 м.

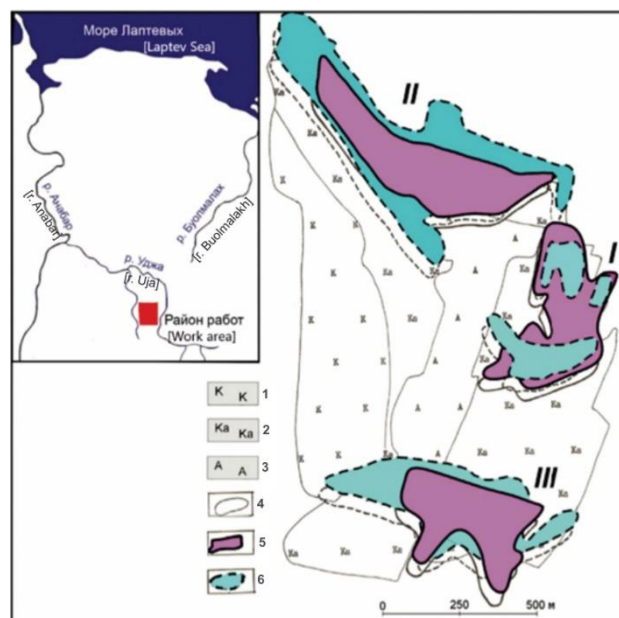


Рис. 19. Площадь распространения пермских угленосных отложений (синие) и эпигенетически измененных продуктов выветривания карбонатитов (красные): I–III – участки: I – Буранный, II – Северный, III – Южный. 1 – безрудные кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты; 2 – редкометалльные кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты; 3 – анкеритовые карбонатиты и анкерит-шамозитовые породы; 4 – геологические границы карбонатитов с развитыми по ним КВ; 5 – контур эпигенетически измененных продуктов выветривания; 6 – контур пермских угленосных отложений. На врезке обзорная схема расположения месторождения Томтор (красный прямоугольник) [48].

[Fig. 19. Occurrence of Permian coal-bearing deposits (blue) and epigenetically altered weathering products of carbonatites (red): I–III – areas: I – Buranny, II – Severnyy, III – Yuzhnyy. (1) – barren calcite and dolomite-calcite carbonatites; (2) – rare-metal calcite and dolomite-calcite carbonatites; (3) – ankerite carbonatites and ankerite-chamosite rocks; (4) – geological boundaries of carbonatites and their weathering crusts; (5) – contours of epigenetically altered products of weathering; (6) – contours of Permian coal-bearing sedimentary rocks. Inset map shows the location of the Tomtor deposit (red rectangle) [48].]

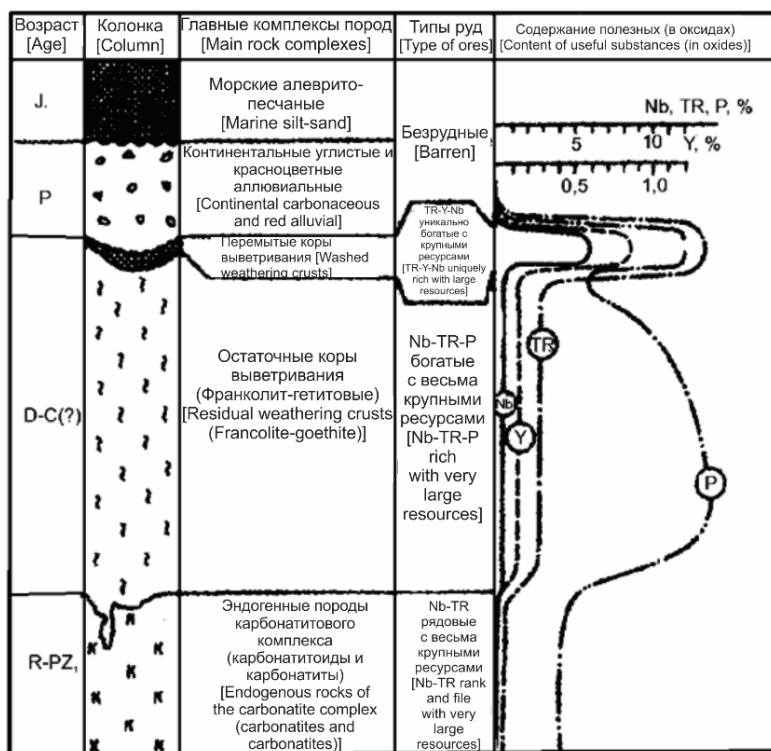


Рис. 20. Геологическое строение редкометалло-скандий-ниобиевого месторождения Томтор [49]
[Fig. 20. Geological structure of the rare-metal scandium-niobium Tomtor deposit [49].]

Авторы работы [51] считают формирование богатых руд Томтора, в частности, участка Буранный, произошло в результате гидротермально-осадочного процесса при вероятной значительной роли биогенного концентрирования фосфатов редких земель. Несколько иная точка зрения изложена в работе [52]. В ней не подтверждают генетической связи уникальных томторских руд с КВ карбонатитов, но свидетельствуют в пользу их более позднего образования в связи с процессом восстановительного эпигенеза продуктов выветривания карбонатитов под воздействием растворов, дренирующих перекрывающие КВ угленосные отложения.

Образования перемыва КВ Томторского месторождения слагают единый рудоносный покров мощностью 10–35 м на площади 3.5 км x 1.5 км. Преобладающие минералы – апатит, пироксеноид, монацит, циркон-ксенотим, редкоземельные фосфаты, рутил, ильменорутит. Y и Sc сосредоточены в ксенотиме и циркон-ксенотиме. На знаменитом участке Буранном средние содержания ценных компонентов таковы (%): Nb₂O₅ – 4.9, Ta₂O₅ – 0.005, Y₂O₃ – 0.87, TR₂O₃ – 12.8, Sc₂O₃ – 0.065, ZrO₂ – 0.29, ThO₂ – 0.15, UO₃ – 0.01, SrO – 3.9, Y₂O₅ – 1.2, P₂O₅ – 16.4. Весьма существенные средние концентрации Sc₂O₃ – 0.065 %, связанные с ксенотимами и ксенотим-цирконами, отнесенные к интервалу КВ мощностью 35 м. Полагают, что запасы скандия на Томторе превышают аналогичный суммарный показатель для всех месторождений Бразилии.

Мезозойские месторождения. В провинции Цзянси (Южный Китай) по редкоземельным гранитам развиты мезозойские и более молодые КВ с «ионными рудами». Месторождение Раян существенно иттриевое. Его запасы Y₂O₃ 120 тыс. т, а всех TR₂O₃ – 200 тыс.

т при содержании 0.1 %. Месторождение Джой-Пэй-Тин (провинция Гуандун) – рудоносные галлуазит-каолинитовые КВ мощностью 7.5 м на площади 2.5x0.6 км. 90 % запасов (8 тыс. т TR₂O₃, треть – Y₂O₃) – «ионные руды», остальное – зерна ксенотима и монацита.

Казахстан. На западном борту Тургайской рифтогенной зоны находится месторождение Кудынбай (10 км x 3 км). В нем на гранитизированных породах нижнего протерозоя развита мезозойская КВ мощностью 20–200 м. Главные её рудные минералы: фосфаты TR, бастнезит (0.4 кг/т), чёрчит (2.8 %), монацит, рабдофанит, ксенотим. Содержания «ионных руд» 13–90 %. Отмечено, что Y₂O₃ больше в КВ по амфиболитам.

На месторождении Алтынташ, Южный Урал, металлоносны мезозойские монтмориллонитовые КВ мощностью 10–100 м, развитые по туфам среднего состава и порфиритам. В глинах есть редкоземельный апатит, ксенотим, чёрчит. Основная минерализация «ионная» (25–40 %). Концентрации триоксидов REE – 700 г/т, около 20 % запасов Y₂O₃.

Кайнозойские месторождения. В Сибири сформировались кайнозойские КВ по карбонатитам щелочно-ультраосновных массивов и основные редкометальные россыпи, в т.ч. с танталониобатами. Наиболее крупным является Белозиминское, запасы ниобия в котором составляют около 40 % запасов этого металла в России. Около одного миллиона тонн Nb₂O₅ (56 % запасов этого месторождения) содержится в КВ щелочно-ультраосновного массива Белая Зима. Оно находится в Восточных Саянах у г. Нижнеудинска Иркутской области. Возраст рудных залежей, связанных с КВ, считается кайнозойским. Наиболее перспективный участок – Ягодный Ключ.

Помимо минералов ниобия (Nb_2O_5 около 0.3–0.8 %) из руд добывают апатит.

Чуктуконское месторождение в пределах Чадобецкого поднятия (Красноярский край) приурочено к КВ карбонатитов, в которой накапливаются Nb и REE. В ней сверху вниз выделяются зоны: 1 – бурых железняков и охр, 2 – выщелачивания и гидрогенной цементации, 3 – дезинтеграции [53]. Наибольшие концентрации полезных компонентов в первой зоне, в средней же отмечается накопление фосфата в виде апатита.

Южная Америка. В Восточной Бразилии, штат Минас-Жерайс, известно уникальное верхнемеловое

(возраст 90 млн лет) карбонатитовое месторождение Баррейру ди Араша (рис. 21), в породах которого содержатся десятые доли процента Ta_2O_5 . Еще в 1996 г. считали, что в нем содержится до 50 % запасов Nb Мира. Однако основную ценность ему придают не коренные залежи, а КВ. В них подсчитано 18 млн т руды с концентрациями пентоксида Nb 2.48 %, в наиболее богатых блоках – 4.3 % Nb_2O_5 . Площадь массива и развитых на нём КВ 5 км². В соседнем массиве Баррейру ресурсы содержащих ниобий руд в КВ и коренных карбонатитах доходят до 1 млрд т. Эта площадь не единственная, хотя и выделяется по запасам.

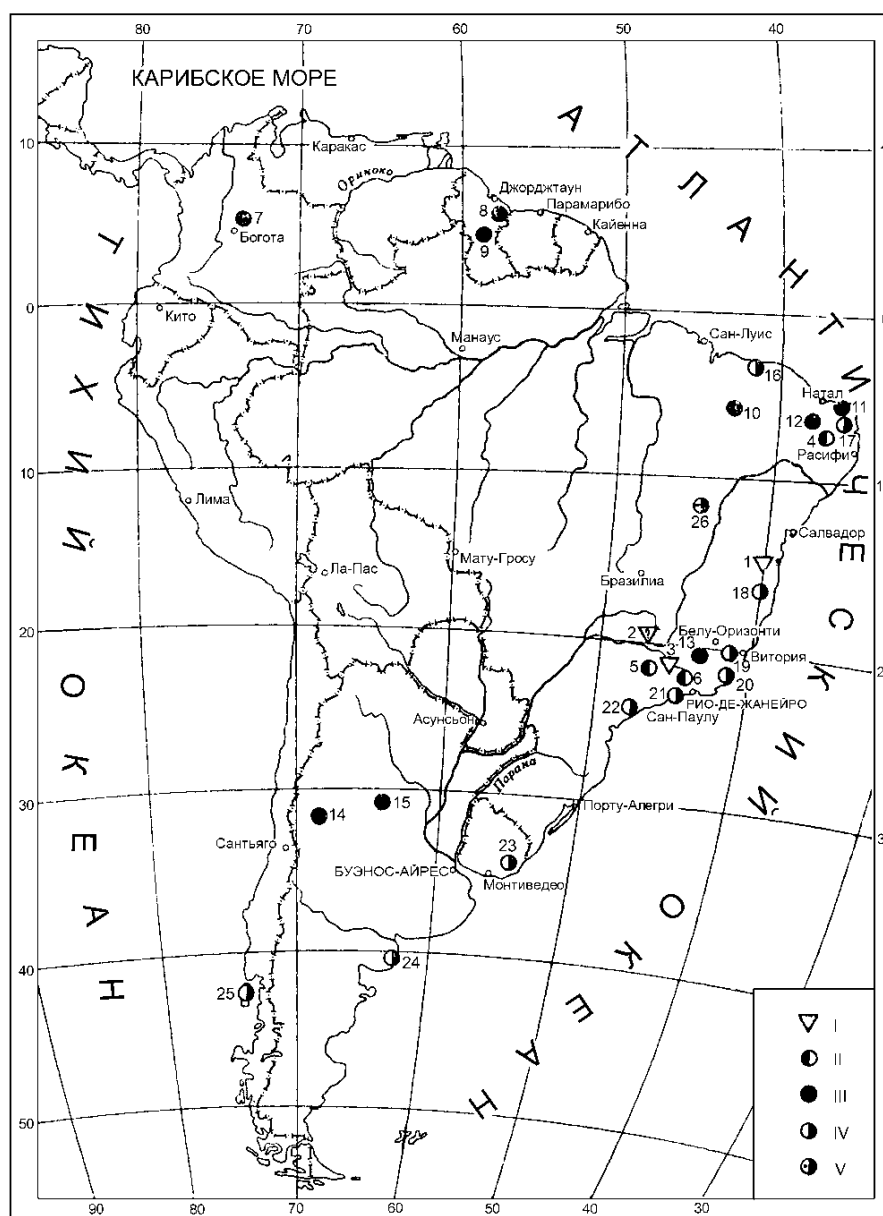


Рис. 21. Россыпи и месторождения REE, в Южной Америке. [54]: I – связанные с КВ; россыпи II – ближнего сноса; III – водных потоков; IV – водоемов; V – метаморфизованные. Месторождения КВ: 1 – Кан, Рибейру, Крус; 2 – Баррейру ди Араша; 3 – Морру ду Ферру. Россыпи ближнего сноса: 4 – плато Борборема; 5 – Посус ди Калдас; 6 – Назарену и Пайол-Риу Абайшу. Россыпи водных потоков: 7 – Богота; бассейны рек: 8 – Румонг-Румонг и Марабизи; 9 – р. Рупунуни; 10 – р. Париаиба; 11 – Сериди и Асу; 12 – мелких рек штата Риу Гранди; 13 – рек Помба и Муриаэ; 14 – Сан-Хуан; 15 – Рио Терсеро. Россыпи водоемов: 16 – побережье штата Мараньян; 17 – Натал; 18 – Кумуруша-тиба, Гуаратуба и др.; 19 – Виктория; 20 – Боа Виста де Сири; 21 – Ангра дус Рейс; 22 – Сан Себастьян; 23 – побережье Уругвая; 24 – Аргентина; 25 – остров Чилоэ. Метаморфизованные россыпи: 26 – Серра Жакобина.

[Fig. 21. Placers and REE deposits in South America. [54]: I – associated with KV; placers II – near demolition; III – water flows; IV – reservoirs; V – metamorphosed. Place of birth of KV: (1) – Can, Ribeiro, Cruz; (2) – Barreyru di Aracha; (3) – Morro do Ferro. Placers of recent demolition: (4) – Borborea plateau; (5) – Posos di Caldas; (6) – Nazarena and Payol Rio Abaixo. Roembankments of water flows: (7) – Bogota; river basins: (8) – Rumong-Rumong and Marabisi; (9) – R. Rupununi; (10) – p. Pariaiba; (11) – Serida and Asu; (12) – small rivers of the Rio Grande State; (13) – the Pomba and Muriae rivers; (14) – San Juan; (15) – Rio Tercero. Placers of reservoirs: (16) – coast of Maranhão State; (17) – Natal; (18) – Kumurushatiba, Guaratuba, etc.; (19) – Victoria; (20) – Boa Vista de Siri; (21) – Angra dos Reis; (22) – San Sebastian; (23) – coast of Uruguay; (24) – Argentina; (25) – Chiloe Island. Metamorphosed placers: (26) – Serra Jacobina.]

Прочие массивы – Тапира, Жакупиранга (Якупиранга) и др. (возраст 136–60 млн лет), тоже содержат гипогенные монацит-циркон-танталит-пирохлоровые руды, но экономически привлекательны благодаря высокой металлоносности меловых и третичных КВ. Среднее содержания ZrO_2 к ним – 2–3 кг/т. В КВ массива Тапира мощностью 25–200 м подсчитанные запасы руд 165 млн т при содержаниях пентоксида ниобия 1.76 %. Важным компонентом считается скандиеносный (0.01 % Sc) анатаз, содержащий до 30 % TiO_2 .

Гигантские россыпи минералов ниобия (преимущественно), тантала, олова обнаружены на площади месторождения Питинга, штат Амазонас, Бразилия связанного с меловыми-третичными (?) КВ по пегматитам и биотит-микроклиновым гранитам (рис. 22). Породы основания и коры содержат минералы олова, тантала, ниобия. В КВ, занимающих площадь около одного квадратного километра, преобладает ксенотим. Мощность кор – около 35 м. Запасы Ta_2O_5 оценивают в 40 тыс. т.

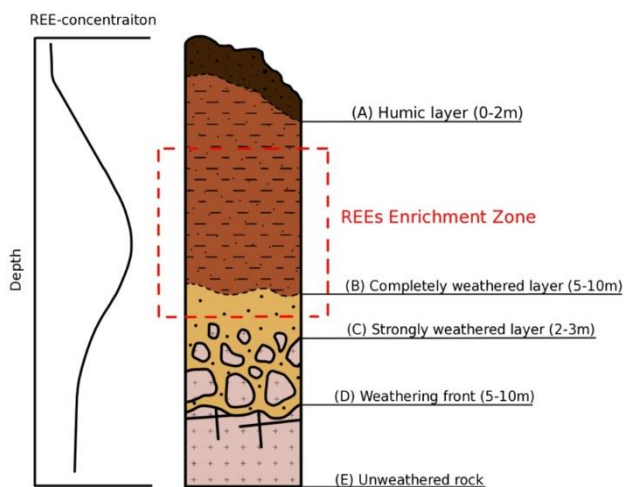


Рис. 22. Профиль коры выветривания по REE-содержащим гранитам [55].

[Fig. 22. Weathering crust profile for REE-containing granites [55].]

В районе Назарену, штат Минас Жераис, танталит и касситерит добывают из элювия по пегматитам, залегающим среди амфиболитовых сланцев, измененных экзогенными процессами до глубины 20 м. Выветривание изменило и пегматиты, превратившиеся в мягкие глины. Ресурсы тантала в меловых и третичных КВ по пегматитам берегового пенеплена оценены во многие тыс. т. Содержания танталита 250 г/т. Месторождение, разрабатываемое более пятидесяти лет, давало в

год 170 т Ta_2O_5 .

Характеризуя редкометалльные россыпи, нельзя не сказать о КВ уникального месторождения бадделеита ZrO_2 на плато Посус ди Калдас, линеймент Сан-Франсиску, Бразилия. Рудный минерал бадделеит, содержащий до 74 % циркония, считается наиболее привлекательным при промышленном переделе. Его источником являются щелочные породы, среди которых больше всего нефелиновых сиенитов. Бадделеит при выветривании высвобождается из калдасита, смеси с цирконом, в которой его скопления находятся в виде линз и жил. Собственно вмещающие фонолиты (эффузивные аналоги нефелиновых сиенитов) превращаются при этом в глину с содержанием калия до 10 %, а нефелиновые сиениты – в пестроцветные глины. Разрабатывают на бадделеит делювий и элювий, ложковый аллювий на месторождениях Понти Алта, Ирэни, Мадама, Родригес, Серроти, Бриджидас.

В горнорудном районе Сан Жуан дел Рей, штат Минас Жераис, максимальные глубины выветривания по пегматитам – 30 м (месторождение Назарену), средняя – 5–15 м. Разрез КВ по пегматитам тут такой (сверху вниз): 1 – белые, мягкие, нацело каолинизированные породы с кварцем и мусковитом. Из сподумена вынесен Li; минерал превращен в агрегат из каолинита и кварца; 2 – полумягкие пегматиты – полевые шпаты частично каолинизированы. Сподумен высвобожден, легко сносится по склонам, накапливаясь у их подножий; 3 – почти не измененные пегматиты. На контакте с этой зоной выделения сподумена не имеют блеска.

Комплекс подобных месторождений ниобия связан с формацией Тапира, одноименный щелочной массив которого (6 км x 7 км) находится в той же рифтогенной зоне, что и Араша. Возраст его карбонатитов 70 млн лет (ларамийский). Следовательно, кайнозойская КВ мощностью от 20 до 200 м с перовскитом, монацитом, анатазом, апатитом содержит TR_2O_3 – 0.3% (запасы 0.6 млн. т), Y_2O_3 – 0.01 %. Общие запасы руд здесь 165 млн т при содержаниях пентоксида ниобия 1.76 %. Иногда в корях обнаруживают до 30 % двуокиси титана в форме скандиеносного анатаза с 0.01 % скандия. Скандий содержится в повышенном количестве в окисленных перовските, титаномagnetите, ильмените. На одном из массивов руды подобного типа подсчитано 340 млн т.

В этом же регионе находится уникальное месторождение Сейс-Лагос, которое содержит в латеритной КВ 80 млн т Nb_2O_5 ; отсюда еще недавно получали также TR, анатаз, апатит. Однако даже это крупнейшее месторождение богатых руд REE эксплуатировать невыгодно из-за тяжелейших природных условий и бездорожья Северной Амазонии. Залежи месторождения

Морру ду Ферру также приурочены к полям развития щелочных пород, но в них нет бадделеита. КВ на них – коричневые латериты, имеет мощность до 100 м. Глинистый материал («сапропель») включает мельчайшие зерна торогуммита $(Th,U)[(SiO_4)_2(OH)_4]$, бастнезита $Ce[F,CO_3]$, ортита. При разложении последнего возникает нерастворимое соединение $La(OH)_3$, сопровождающие окислы Al и Fe. Запасы месторождения около 1 млн т руды с содержанием около 1% ThO_2 и 0.5 % TR, преимущественно цериевой группы.

Североамериканское Атлантическое побережье богато россыпными месторождения REE, образованные за счет размыва КВ. Они дают до 10 % мирового производства циркониевых концентратов из россыпей, 85 тыс. т из 830 тыс. т. Масштабами выделяется россыпь Трейл-Ридж в штате Флорида, рудоносные залежи которой прослежены на 200 км. На ее нескольких участках площадью по 5–10 км х 1–4 км каждый, продуктивные толщи имеют мощность 8–23 м. Содержание циркона здесь – 0.3–0.5 % (в пересчете на ZrO_2 – 0.2–0.34 %), рутила – 1.08 %. Запасы ZrO_2 определены в 1.08 млн т. Прибрежно-морские черные пески штатов Вирджинии и Джорджии, третичные, древнечетвертичные, содержат 0.7 г/т двуокиси циркония и 0.02 г/т золота.

Африка. Для месторождения кальцитовых карбонатов Мрима в Кении характерно равномерное распределение флогопита, апатита, магнетита, пироксена. В нем обнаружены запасы 0.7 млн т Nb_2O_5 с его содержанием 0.7 %. В перекрывающих массив мезозойских и кайнозойских мощных КВ концентрации этого важнейшего компонента возрастают до 0.8 %. Основные африканские ниобийсодержащие КВ и россыпи обнаружены на плато Джос в Нигерии (запасы Nb_2O_5 – 770 тыс. т). В них Nb больше Ta в 12–20 раз, так что месторождения преимущественно ниобиевые. Извлекают также циркон, монацит. Источником минералов являются меловые редкометалльные щелочные граниты.

Существенно танталовые они в Заире (округ Маньем, между озером Киву и р. Конго), где развиты альбитовые пегматиты, граниты, мигматиты с датами 0.6–0.5 млрд лет. Даже реликты КВ здесь имеют до 30–40 м мощности. В них содержания танталита-колумбита до 70 г/т, в оловянном концентрате содержания $Nb_2O_5 + Ta_2O_5$ 1.8–2.9 %. В районах Чонка Ниямбези, Ниямбембе коры, развитые по пегматитам, обогащены Sn, Nb, Ta. Россыпи р. Северный Лугулу (мощность песков 1.5 м) – аллювиальные. Танталит-колумбит (в шлихах до 7 %, содержит 25–50 % Ta_2O_5) и касситерит в них поступили из КВ, развитых по пегматитам и грейзенам. Россыпи по рекам Лугулу и Идиба прослежены на площади до 2.5 тыс. км², мощности песков составляют 0.3–0.4 м. Россыпи Идиба недавно считали самыми крупными в мире. Их шлик на треть сложен танталитом-колумбитом.

Заирское месторождение Луэш (пров. Киву) в латеритных КВ имеет запасы Nb_2O_5 – 1.3 млн т, а в концентрате содержит минералы циркония, TR, фосфора и стронция. Большой экономический интерес представляют латеритные КВ вновь открытого в Габоне

крупного карбонатитового месторождения Мабуни. Его латериты содержат 2 % Nb_2O_5 и 24 % P_2O_5 .

Из россыпей различных генетических типов континента, сформировавшихся за счет продуктов размыва КВ, особый практический интерес представляют прибрежно-морские. Разработка подобных месторождений в провинции Наталь Южной Африки только по циркону достигает 20 % общемировой. Морские россыпи квартала Южной Африки, Мозамбика, Мадагаскара – редкоземельно-редкометалльные, с цирконом в тяжелой фракции до 15 %. Запасы россыпного месторождения Тамативе, Мадагаскар, по ZrO_2 в 1.43 млн т при содержаниях – 0.68 %. В песках около 1 % монацита и ксенотима.

В ЮАР, 180 км северней Дурбана, околонушена современная морская пляжевая россыпь **Ричардс-Бей**. Содержание ZrO_2 в рудных песках, прослеженных на 110 км, – 0.27–0.4 %, запасы – 4.45 млн. т. Разрабатываемые псаммиты мощностью до 30 м содержат (%): циркона – 0.4–0.6 ильменита – 5–6, рутила – 0.3, монацита – 0.1.

Австралия и Океания. В последнее время в никеленосных КВ Новой Каледонии обнаружен скандий, материнскими породами для которых являются гарцбургиты и лерцолиты [56]. Этот элемент с содержаниями до 100 г/т концентрируется в верхней части латеритного профиля (рис. 23). Ее породы с умеренными содержаниями Co и Ni при их добыче идут в отвалы, поскольку эти элементы обычно концентрируются в зонах сапролита и литомаржа. Это открывает благоприятные перспективы извлечения Sc не только из разрабатываемых, но и из отвалов уже отработанных месторождений.

Кайнозойские КВ являются богатейшим источником РМ для элювиальных, делювиальных, аллювиальных и прибрежно-морских россыпей. Они нередко отличаются огромными запасами и разнообразием полезных компонентов. Морские прибрежные и пляжевые россыпи, кроме того, еще и самовозобновляемые. В них сосредоточено около 50% всех ресурсов россыпного циркона. В штате Квинсленд, Австралии, по масштабам из большого числа подобных выделяется месторождение Гринбушес. Там в долине р. Бунбури Гули россыпи достигают мощностей 7–18 м, а содержания касситерита – 250 кг/т, колумбит-танталита, танталита – 10–20 кг/т. При этом, больше танталовых минералов фиксируется на поднятиях с выходящими в эрозионный срез породами фундамента с его редкометалльными пегматитами. Но в 200–300 м от них содержания танталовых минералов стремительно сокращаются. Впрочем, драгами разрабатывают россыпи уже с содержаниями касситерита 200 г/т и танталита – 20 г/т. В Западной Австралии у г. Порт-Хедленд открыто подобное Гринбушес месторождение Уоджина. В его шлихах (%): танталита – 23 (до 1 кг/м³ и более), касситерита – 20, гематита, ильменита – 25, магнетита – 20. Россыпи с танталом, связанные с КВ по пегматитам, есть и на Северной Территории – Порт-Дарвин-Вест-Арт, Финниш Ривер, Бинос-Харбор, где танталита в

шлихах до 45 %.

Шельфовые россыпи штата Виктория с минералами REE значительны по запасам. Самая крупная из них – ВИМ-150 (ресурсы TR_2O_3 – 1.4 млн т, Y_2O_3 – 230 тыс. т). Её Ti-Zr пески с ксенотимом и монацитом развиты на площади 25 км². Мощности рудоносных отложений квартера 10–15 м. Содержания полезных компо-

нентов (%): TiO_2 – 1.2; CeO – 0.3; TR_2O_3 – 0.044; Y_2O_3 – 0.007. Запасы ZrO_2 3.38 млн т (9.1 % мировых), содержания диоксида циркония – 0.34%. В песках выявлены следующие концентрации (%): циркона – 0.5, ильменита – 1.26, лейкоксена – 0.45 %, рутила – 0.33, монацита и ксенотима – по 0.02.

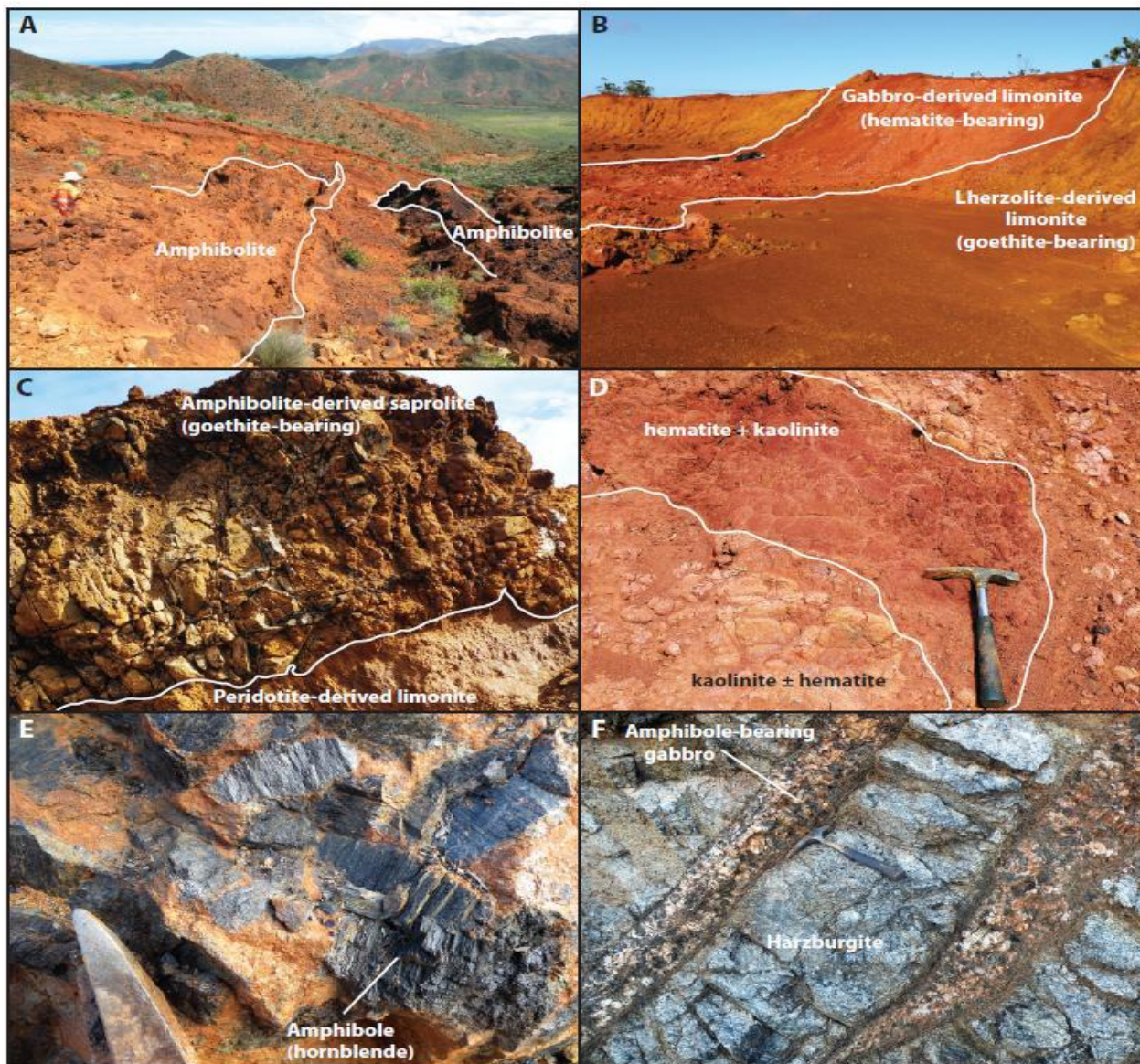


Рис. 23. Полевые фотографии латеритов, полученных из амфиболитов и габбро: А – Выветренные дайки амфиболита, пересекающие латериты, полученные из гарцбургита. Выведенные дайки образуют положительные формы рельефа из-за повышенной устойчивости к выветриванию (N'Go); В – Содержащие гематит латериты, полученные из габбро, пересекающие латериты, полученные из лерцолита (Tiébaghi). С – Содержащая гетит, сапролитизированная дайка амфиболита, залегающая на латерите, полученном из гарцбургита или дунита (N'Go); D – Внутренняя фациальная зональность в сапролите, полученном из габбро, демонстрирующая бледно-красноватые зоны, в которых преобладает каолинит ± гематит, и более темные красноватые зоны с более высокой долей гематита (Tiébaghi); E – Невыветрелый амфиболит, содержащий мегакристаллы амфибола (роговой обманки) (N'Go); F – Невыветрелые интрузии габбро, содержащие амфибол (Tiébaghi) [56].

[Fig. 23. Field photographs of amphibolite- and gabbro-derived laterites: (A) – Weathered amphibolite dikes intersecting Harzburgite-derived laterites. Exposed dikes form positive landforms due to increased resistance to weathering (N'Go); (B) – Hematite-bearing gabbro-derived laterites intersecting lherzolite-derived laterites (Tiébaghi). (C) – Goethite-bearing, saprolitic amphibolite dyke overlying laterite, derived from harzburgite or dunite (N'Go); (D) – Internal facies zonation in saprolite, from HF gabbro, showing pale reddish zones dominated by kaolinite ± hematite, and darker reddish zones with a higher proportion of hematite (Tiébaghi); (E) – Unweathered amphibolite containing hornblende megacrysts (N'Go); (F) – Unweathered gabbro intrusions containing amphibole (Tiébaghi) [56].]

На западе Австралии титан-циркониевое с монацитом поздне-третичное-плейстоценовое месторождение Энибба связано с погребенными на глубину 25 м морскими россыпями, развитыми на площади 12 x 1.2 км. Запасы TR_2O_3 – 80 тыс. т, содержания – 0.02%, запасы ZrO_2 – 4.24 млн. т (11.4 % мировых) при содержаниях его 0.34–1.71%. Минералов в естественном шликере (%): циркона – 0.5–2.5, ильменита – 3.7, рутила – 0.75, монацита – 0.1. Западной есть еще одна россыпь с запасами TR_2O_3 – 150 тыс. т и высокими содержаниями.

В 170 км северней г. Перт морские поздне-третичные-четвертичные россыпи Кулджарлу протянулись на 190 км при общей площади 60 км². Запасы рудных песков здесь 0.8 млн т. Содержания минералов (%): циркон – 0.3–0.5 %, ильменит – 1.9, рутил – 0.16, монацит – 0.1, лейкоксен – 0.4. Количество ZrO_2 в песках – 0.2–0.34 %. Западноавстралийская морская поздне-третичная-плейстоценовая россыпь Кэйпел имеет запасы ZrO_2 – 2.43 млн т. Содержания диоксида циркония – 0.47–0.8%. Минералов в песках (%): циркона – 0.3–0.5, ильменита – 11–18, рутила – 0.3.

На Украине основным редкоземельным минералом кристаллических пород и КВ является монацит, широко распространенный и на отдельных площадях достигающий высоких концентраций. Другие редкоземельные минералы – ксенотим, каризит, ортит, чевкинит, бритоцит встречаются редко и представляют лишь минералогический интерес. Монацитоносными являются каолины мощностью 15–20 м аплитопегматоидных гранитов. Содержание монацита в каолинах Среднего Приднестровья до 3 кг/м³, а в ополоскованных проявлениях Винницкой области в КВ чудново-бердичевских гранитов – 2–22.8 кг/м³ при мощности пласта 2–20 м. Вместе с монацитом содержатся циркон (1.15), ильменит (44.1) и ксенотим (9 кг/м³).

Выводы. В КВ и образованиях их ближайшего сноса сосредоточены крупные запасы РМ. Их носителями в материнских породах чаще всего являются минералы карбонатитов, пегматитов и гранитов. В КВ РМ сосредоточены в остаточных минералах-носителях (монацит, циркон, ортит, ксенотим и другие), а также в «ионных» рудах глинистого элювия, развитого по разному по составу материнским породам. Мощные КВ с РМ образовались уже в палеозое на легко выветривающихся карбонатитах (Восточная Сибирь). В мезозое появились КВ с ионными рудами на гранитоидах (Китай). Для кайнозоя характерны латеритные КВ в тропических странах с многочисленными в них месторождениями.

Заключение

В КВ Мира сосредоточены порядка 80 % силикатного никеля, около 10 % кобальта, 1 % золота и не менее 10–15 % редких металлов. Формирование рассмотренных полезных ископаемых происходит на разных стадиях образования КВ. Для никеля и кобальта оно начинается в зоне дезинтеграции и выщелачивания гипербазитов, максимума достигает в сапролите и падает в верхней зоне. Месторождения этих металлов извест-

ны только с мезозоя, но основные запасы сосредоточены в кайнозое тропических стран.

Первые редкие аккумуляции золота в КВ установлены в палеозое. В мезозойское время их количество резко возросло. В них золото могло накапливаться во всех зонах профиля выветривания, но наибольшие содержания приурочены к иллит-каолинистым глинам зоны гидролиза. Основное же количество месторождений и запасов Au, как Ni и Co сосредоточено в латеритах кайнозоя тропических стран.

В КВ и образованиях их ближайшего сноса сосредоточены крупные запасы РМ. Их носителями в материнских породах чаще всего являются минералы карбонатитов, пегматитов и гранитов. В КВ РМ сосредоточены в остаточных минералах-носителях (монацит, циркон, ортит, ксенотим и другие), а также в «ионных» рудах глинистого элювия, развитого на разном по составу материнским породам. Мощные КВ с РМ образовались уже в палеозое на легко выветривающихся карбонатитах (Восточная Сибирь). В мезозое появились КВ с ионными рудами на гранитоидах (Китай). Для кайнозоя характерны латеритные КВ в тропических странах с многочисленными в них месторождениями.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савко А. Д., Овчинникова М. Ю. Минералогия кор выветривания. Сообщение первое: руды железа, алюминия, марганца // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 2. С. 86–103. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/86-103
2. Старостин В. И. Металлогения: учебник. 3-е изд., испр. и доп. М.: МАКС Пресс, 2021. 652 с.
3. Савко А. Д., Бугельский Ю. Ю., Новиков В. М., Слукин А. Д., Шевырев Л. Т. Кобы выветривания и связанные с ними полезные ископаемые. Воронеж: Истоки, 2007. 355 с.
4. Савко А. Д. Минералогия кор выветривания. Труды научно-исследовательского института геологии: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 95. 2016. 144 с.
5. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Историческая минералогия в 3-х томах: Т.1. Введение в историческую минералогию.-Воронеж: ВГУ. 2005. 590 с.; Т.2. Историческая минералогия древних платформ.-Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с.; Т.3. Историческая минералогия подвижных суперпоясов.-Воронеж: ВГУ. 2008. 622 с.
6. Шевырев Л. Т., Савко А. Д. Рудные месторождения России и Мира. Справочник и учебное пособие. Издание 3-е исправленное и дополненное. Труды научно-исследовательского института геологии: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 101. 2017. 457 с.
7. Elias M. Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. Special Publication 4. CODES Centre of Ore Deposit Research, 2002. 23 p
8. Лазаренков В. Г., Таловина И. В., Белоглазов И. Н., Володин В. И. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения. Санкт-Петербург: «Недра», 2006. 188 с.
9. Никеленосные коры выветривания Урала. М.: Наука, 1970. 284 с.
10. Geologi Makassar [Электронный ресурс]: URL: ourgeology.blogspot.com/2010_08_01_archive.html?m=1 (дата обращения 21.10.2024)
11. Горнодобывающая промышленность Индонезии и место в

- ней никелевой отрасли [Электронный ресурс]: URL: <http://mineral.ru/Analytics/worldtrend/132/309/index.htm> (дата обращения 21.10.2024)
12. Индонезийско-Филиппинская никеленосная провинция [Электронный ресурс]: URL: <http://mining-enc.ru/i/indonezijsko-filippinskaya> (дата обращения 21.10.2024)
 13. Aquino K. A.; Arcilla C. A.; Schardt C.; Tupaz C.A.J. Mineralogical and Geochemical Characterization of the Sta. Cruz Nickel Laterite Deposit, Zambales, Philip pines // *Minerals*. 2022. 12. 305. DOI : <https://doi.org/10.3390/min12030305>
 14. Вершинин А. С. Геология, поиски и разведка гипергенных месторождений никеля. М.: Недра, 1993. 302 с.
 15. Петровская Н. В., Яблокова С. В. Золото в корях выветривания // *Рудоносные коры выветривания*. М.: Наука, 1974. С. 173–182.
 16. Росляков Н. А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука, 1981. 237 с.
 17. Калинин Ю. А., Росляков Н. А., Нестеренко Г. В., Рослякова Н. В. О перспективах золотоносности кор выветривания юга Западной Сибири // *Проблемы золотоносности Южной Сибири*. Новокузнецк, 2001. С. 50–61.
 18. Калинин Ю. А., Росляков Н. А., Прудников С. Г. Золотоносные коры выветривания Сибири. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2006. 339 с.
 19. Калинин Ю. А., Ковалёв К. Р., Наумов Е. А., Кириллов М.В. Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 3. С. 241–257.
 20. Калинин Ю. А., Пальянова Г. А., Бортников Н. С., Наумов Е. А., Ковалев К. Р. Механизмы агрегации и дифференциации золота и серебра при формировании золотоносных кор выветривания (на примере месторождений Казахстана) // *ДАН*. 2018. Т. 482. № 2. С. 190–195.
 21. Паленова Е. Е., Новоселов К. А., Белогуб Е. В. Золото в корях выветривания Гвианского щита // *Минералогия*. 2019. № 2. С. 83–100
 22. Никифорова З. С., Калинин Ю. А., Макаров В. А. Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 11. С. 1514–1534.
 23. Кузнецова И. В. Деметтиенко А. И. О микро- и наноразмерном золоте в корях выветривания золотоносных территорий (на примере участка минерализации в бассейне р. Адамиха, Приамурье) // *Георесурсы*. 2023. Т. 25 № 3. С. 191–193.
 24. Reith F., Stewart L., Wakelin S. A. Supergene gold mineralization: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand // *Chemical Geology*. 2012. Vol. 320–321. P. 32–45.
 25. Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G. Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments // *Chemical Geology*. 2017. Vol. 450. P. 154–164.
 26. Anand R., Salama W. Gold dispersion in transported cover sequences especially in chemical (palaeoredox front) and physical (unconformity) interfaces linked to the landscape history of Western Australia // *Explor. Newslett. Assoc. Appl. Geochem.* 2019. No. 18. P. 1–40.
 27. Беневоольский Б. И., Ганеев И. Г., Скрипченко В. В., Чернов Д. В., Чайка В. М. Рудные ресурсы и их размещение по геоперодам. Благородные металлы (МПГ, золото, серебро): справ. пособие. Под ред. Д. В. Рундквиста. М.: Недра, 1995. 223 с.
 28. Росляков Н. А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука, 1981. 238 с.
 29. Белогуб Е. В. Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала: дисс. ... д-ра геол. мин. наук. 2009. 537 с.
 30. Петров В. П. Основы учения о древних корях выветривания. М.: Недра, 1967. 344 с.
 31. Коробушкина Е. Д., Коробушкин И. М. Взаимодействие золота с бактериями и образование «нового» золота // *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 287. № 4. С. 978–980.
 32. Маракушев С. А., Ковалевская А. А., Сафронов П. П. Бактериальная перекристаллизация золота // *Докл. АН СССР*. 1989. Т. 308. № 2. С. 482–485.
 33. Маракушев С. А. Геомикробиология и биохимия золота. М.: Наука, 1991. 109 с.
 34. Амосов Р. А., Васин С. Л. Золотые микрофоссилии // *Руды и металлы*. 1993. № 3. С. 101–107.
 35. Куиимова Н. Г., Жилин О. В. Биогенная кристаллизация ионного золота микромицетами // *Докл. РАН*. 2002. Т. 386. № 6. С. 809–812.
 36. Калинин Ю. А. Бакшеев Н. А., Жмодик С. М., Житова Л. М. Биогенное золото из кор выветривания и россыпей Салаира. Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: материалы Междунар. науч. конф., посвящённой 110-летию со дня рождения акад. Константина Игнатьевича Лукашова (1907–1987). Отв. ред. О. В. Лукашев. В. 2 ч. Минск: БГУ, Право и экономика, 2017. Ч. 2. С. 18–20.
 37. Melchiorre E. B., Orwin P. M., Reith F., Rea M.A.D., Yahn J., Allison R. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA // *Minerals*. 2018. No. 8(56). P. 1–20.
 38. Осовецкий Б. М. Современные горизонты наноминералогии золота. *Россыпи и месторождения кор выветривания: изучение, освоение, экология: материалы международного совещания*. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 178–180.
 39. Божко Е. Н., Савко А. Д. Золотоносность Бирримского массива (Западная Африка). Труды научно-исследовательского института геологии: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 33. 2005. 131 с.
 40. Кузнецова О. Ю. Минералого-геохимические особенности золотоносных кор выветривания Урала (на примере Светлинского и Каталамбинского месторождений): автореф. дисс. ... кан. геол. мин. наук. М., 2000. 19 с.
 41. Артеева Т. А. Минералогия золота кор выветривания хребта Манитаньрд. *Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения: материалы международного совещания*. Новосибирск: ООО «Апельсин», 2010. С. 59–64.
 42. Савко А. Д., Шевырев Л. Т., Ильяш В. В., Окороков В. А. Геохимические особенности и генезис золота осадочного чехла Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета Серия Геология*. 1996. № 2. С. 86–95.
 43. Савко А.Д., Шевырев Л.Т. Лоскутов В.В. Эксгалиационно-осадочная металлоносность Воронежской антеклизы – новые горизонты поисков рудных месторождений в осадочном чехле. Статья 1. Интерметаллиды :локализация , типы, состав // *Вестник Воронежского государственного университета Серия Геология*. 1999. № 7. С. 139–154.
 44. Янченко О. М., Тимкин Т. В., Ворошилов В. Г., Мартыненко И. В. Знаи М. Морфология и состав золота кор выветривания Томь-Яйского междуречья // *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 2. С. 84–92.
 45. Баранников А. Г. Золотоносность Гогинского рудно-россыпного района (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2006. 197 с.
 46. Богатырев Б. А. Бокситы – новый перспективный вид сырья на золото. *Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения: материалы международного совещания*. Новосибирск: ООО «Апельсин», 2010. С. 107–110.
 47. Чайка В. М. Рифейды Центральной Сахары. М.: Наука, 1979. 174 с.
 48. Месторождение Томтор [Электронный ресурс]. URL: [ru.wikipedia.org/wiki/Томтор_\(месторождение\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Томтор_(месторождение)). (Дата обращения: 21.10.2024)
 49. Рудные ресурсы и их размещение по геоперодам. Редкие металлы: тантал, ниобий, скандий, редкие земли, цирконий, гафний: справ. пособие. Под ред. Д. В. Рундквиста. М.: Недра, 1995. 223 с.
 50. Толстов А. В., Коноплев А. Д., Кузьмин В. И. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // *Разведка и охрана недр*. 2011. №6. С. 20–26.

51. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л., Толстов А. В., А. В. Щербов А. В., Карманов Н. С., Герасимов Е. Ю., Брянская А. В. Главные породообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115.
52. Лапин А. В., Куликова И. М., Набелкин О. А. Поверхностные образования на корях выветривания карбонатитов (к проблеме генезиса уникальных редкометалльных руд месторождения Томтор, Россия) // *Литология и полезные ископаемые*. 2021. №4. С. 364–384.
53. Цыкина С. В. Зональность редкометалльного оруденения коры выветривания карбонатитов Чукотского месторождения // *Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири*. Вып. 4. Красноярск, КНИИГиМС, 2003. С.153–158.
54. Колотухина С. Е. Структурное положение редкометалльных провинций на древних платформах Южного полушария. М.: Наука, 1975. 87 с.
55. Regolith-hosted rare earth element deposits [Электронный ресурс]. URL: en.wikipedia.org/wiki/Regolith-hosted_rare_earth_element_deposits (Дата обращения: 21.10.2024)
56. Teitler Y. M., Cathelineau M., Ulrich, Ambrosi J.P., Munoz M., Sevin B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites // *Journal of Geochemical Exploration*. 2019. Vol. 196. P. 131–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.009>

UDC 553.481

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/74-102>

Received: 30.10.2024

Accepted: 22.11.2024

Published online: 27.12.2024

Minerageny of weathering crusts. Part two: Ores of nickel and cobalt, gold, rare metals

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

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

Abstract

Introduction: the weathering crusts of the world contain about 80 % of silicate nickel, about 10 % of cobalt, 1 % of gold and at least 10–15 % of rare metals (REE). The reserves of the latter in the weathering crusts are calculated in total with the reserves in the parent rocks, so there are no exact data for each of them separately, and the given figure is approximate. A necessary condition for the accumulation of metals is the presence of a useful component in the parent rock. The content of the above metals in it varies from hundredths to 1–2 % or more percent.

The research *methodology* and factual material are described in report one [1].

Results and discussion: unlike earlier accumulations of Al, Fe and Mn, deposits of silicate Ni and Co, developed in the weathering crusts on alpine-type ultrabasic rocks, appeared only in the Mesozoic. They were formed during periods of powerful crust formation with ages of the late Triassic-Early Jurassic and Early Cretaceous. Where the weathering crusts were not overlapped by marine sediments, the indicated time intervals could be longer, up to the end of the Cretaceous period. Mesozoic weathering crusts contain insignificant reserves of Ni and Co ores. They are concentrated mainly in the territory of Russia within the Urals and in Kazakhstan. The main part of Ni is confined to the zone of nontronite clays and the lower part of the other zone of weathering crusts. More than 80 % of the reserves of silicate nickel are associated with laterite Cenozoic weathering crusts. They are widespread in the territories of countries with a tropical climate. Weathering crusts is characterized by the presence of high-quality ores in zones of disintegrated serpentinites and saprolites. Under laterites, in the cuirass, Ni and Co are practically absent. The richest deposits are recorded on gentle slopes and in saddles of mountain spurs. A necessary condition for gold accumulation in weathering crusts is its increased content in the parent rocks. Linear and contact-karst



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

zones are very favorable for the formation of increased concentrations of metal. The first rare accumulations of Au in weathering crusts are known in the Paleozoic. In the Mesozoic, their number increased sharply. In them, gold could accumulate in all zones of the weathering profile, but the highest contents are confined to illite-kaolinite clays of the hydrolysis zone. The main number of deposits and reserves of the metal are concentrated in lateritic weathering crusts of the Cenozoic in tropical countries. It is concentrated in saprolite, lithomarge and laterite cuirass, and its highest contents gravitate toward the upper part of the weathering profile. Gold can accumulate during the formation of bauxites. Such deposits are often complex gold-alumina. Tantalum and niobium accumulate in the form of independent minerals, gallium (in bauxites), and rare earth elements. The latter can be both in the composition of minerals and "ionic ores", in which they are sorbed by clay minerals. The remaining elements most often migrate from the weathering profile. Large reserves of REE are concentrated in the weathering crusts and the formations of their nearest demolition. Their carriers in the parent rocks are most often minerals of carbonatites, pegmatites, and granites. In the weathering crusts, rare earth elements are concentrated in residual carrier minerals (monazite, zircon, orthite, xenotime, and others), as well as in "ionic" ores of clay eluvium, developed along parent rocks of different compositions. Powerful weathering crusts with REE were formed already in the Paleozoic on carbonatites (Eastern Siberia). In the Mesozoic, weathering crusts with ionic ores appeared on granitoids (China). Lateritic weathering crusts in tropical countries with numerous REE deposits are typical for the Cenozoic.

Conclusion: the formation of weathering crusts deposits of the considered metals was affected by the evolution of crust formation and associated ore genesis over time. Of particular importance was the emergence of vegetation on land in the Devonian, which resulted in a sharp intensification of weathering processes and the formation of hypogene deposits. The largest accumulations of the considered metals are confined to the Cenozoic.

Keywords: Weathering crust, nickel and cobalt, gold, rare metals

For citation: Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu. Minerageny of weathering crusts. Part two: Ores of nickel and cobalt, gold, rare metals // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 4, pp. 74–102. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/74-102>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. 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>
2. Starostin V. I. *Metallogeniya: uchebnik* [Metallogeny: textbook]. 3rd ed., corrected and supplemented. Moscow, MAX Press publ., 2021. 652 p. (In Russ.)
3. Savko A. D., Bugel'skii Yu. Yu., Novikov V. M., Slukin A. D., Shevyrev L. T. *Kory vyvetrivaniya i svyazannye s nimi poleznye iskopaemye* [Weathering crusts and associated minerals]. Voronezh, Istoki publ., 2007. 355 p. (In Russ.)
4. Savko A. D. Minerageniya kor vyvetrivaniya [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.)
5. 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 minerageny]. 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 podvizhnykh superpoyasov*. [Historical minerageny of mobile superbelts]. Voronezh, VSU publ., 622 p. (In Russ.)
6. Shevyrev L. T., Savko A. D. *Spravochnik i uchebnoe posobie. Izdanie 3-e ispravlennoe i dopolnennoe* [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.)
7. Elias M. Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. Special Publication 4. CODES Centre of Ore Deposit Research. 2002. 23 p.
8. Lazarenkov V. G., Talovina I. V., Beloglazov I. N., Volodin V. I. *Platinovye metally v gipergennykh nikel'nykh mestorozhdeniyakh i perspektivy ikh promyshlennogo izvlecheniya* [Platinum metals in hypogene nickel deposits and prospects for their industrial extraction]. St. Petersburg, Nedra publ., 2006, 188 p. (In Russ.)
9. *Nikelenosnye kory vyvetrivaniya Urala* [Nickel-bearing weathering crusts of the Urals]. Moscow, Nauka publ., 1970. 284 p. (In Russ.)
10. Geologi Makassar. Available at: ourgeology.blogspot.com/2010_08_01_archive.html?m=1 (accessed 21.10.2024)
11. The mining industry of Indonesia and the place of the nickel industry in it. Available at: <http://mineral.ru>Analytics/world-trend/132/309/index.htm> (accessed 21.10.2024)
12. Indonesian-Philippine nickel province [Electronic resource]: Available at: <http://mining-enc.ru/i/indonezijsko-filippinskaya> (accessed 21.10.2024)
13. Aquino K. A.; Arcilla C. A.; Schardt C.; Tupaz C.A.J. Mineralogical and Geochemical Characterization of the Sta. Cruz Nickel Laterite Deposit, Zambales, Philippines. *Minerals*, 2022, 12, 305, DOI: <https://doi.org/10.3390/min12030305>
14. Vershinin A. S. *Geologiya, poiski i razvedka gipergennykh mestorozhdenii nikelya* [Geology, prospecting and exploration of hypogene nickel deposits]. Moscow, Nedra publ., 1993. 302 p.

(In Russ.)

15. Petrovskaya N. V., Yablokova S. V. Zoloto v korakh vyvetrivaniya [Gold in weathering crusts]. *Rudonosnye kory vyvetrivaniya* [Ore-bearing weathering crusts]. Moscow, Nauka publ., 1974, pp. 173–182. (In Russ.)
16. Roslyakov N. A. *Geokhimiya zolota v zone gipergeneza* [Geochemistry of gold in the hypergenesis zone]. Novosibirsk, Nauka publ., 1981. 237 p. (In Russ.)
17. Kalinin Yu. A., Roslyakov N. A., Nesterenko G. V., Roslyakova N. V. O perspektivakh zolotonosnosti kor vyvetrivaniya yuga Zapadnoi Sibiri [On the prospects of gold bearing in weathering crusts in the south of Western Siberia]. *Problemy zolotonosnosti Yuzhnoi Sibiri* [Problems of gold bearing in Southern Siberia]. Novokuznetsk, 2001. pp. 50–61 (In Russ.)
18. Kalinin Yu. A., Roslyakov N. A., Prudnikov S. G. *Zolotonosnye kory vyvetrivaniya Sibiri* [Gold-bearing weathering crusts of Siberia]. Novosibirsk, Acad. publishing house "Geo", 2006. 339 p. (In Russ.)
19. Kalinin Yu. A., Kovalev K. R., Naumov E. A., Kirillov M. V. Zoloto kory vyvetrivaniya Suzdal'skogo mestorozhdeniya (Kazakhstan) [Gold from the weathering crust of the Suzdal deposit (Kazakhstan)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 241–257 (In Russ.)
20. Kalinin Yu. A., Palyanova G. A., Bortnikov N. S., Naumov E. A., Kovalev K. R. Aggregation and Differentiation of Gold and Silver during the Formation of the Gold Bearing Regolith (on the Example of Kazakhstan Deposits). *DAN – Doklady Akademii nauk*, 2018, vol. 482, no. 2, pp. 190–195 (In Russ.)
21. Palenova E. E., Novoselov K. A., Belogub E. V. Gold in weathering mantle of the Guiana shield (South America). *Mineralogiya – Mineralogy*, 2019, no. 2, pp. 83–100 (In Russ.)
22. Nikiforova Z. S., Kalinin Yu. A., Makarov V. A. Evolution of native gold under exogenous conditions. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 11, pp. 1514–1534 (In Russ.)
23. Kuznetsova I. V., Dementienko A. I. About micro- and nanoscale gold in the vell of gold-bearing territories (on the example of a mineralization site in the Adamikha, Amur region). *Georesursy – Georesources*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 191–193 (In Russ.)
24. Reith F., Stewart L., Wakelin S. A. Supergene gold mineralization: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, 2012, vol. 320–321, pp. 32–45.
25. Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J. E., Parsons J. M., Southam G. Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*, 2017, vol. 450, pp. 154–164.
26. Anand R., Salama W. Gold dispersion in transported cover sequences especially in chemical (palaeoredox front) and physical (unconformity) interfaces linked to the landscape history of Western Australia. *Explor. Newslett. Assoc. Appl. Geochem*, 2019, no. 18, pp. 1–40.
27. Benevol'skii B. I., Ganeev I. G., Skripchenko V. V., Chernov V. D., Chaika V. M. *Rudnye resursy i ikh razmeshchenie po geopokham. Blagorodnye metally (MPG, zoloto, srebro). Spravochnoe posobie* [Ore resources and their distribution by geoePOCHs. Noble metals (PGM, gold, silver). Reference manual]. Ed. by academician D. V. Rundqvist. Moscow, Nedra publ., 1995. 223 p. (In Russ.)
28. Roslyakov N. A. *Geokhimiya zolota v zone gipergeneza* [Geochemistry of gold in the hypergenesis zone]. Novosibirsk, Nauka publ., 1981. 238 p. (In Russ.)
29. Belogub E. V. *Gipergenez sul'fidnykh mestorozhdenij Juzhnogo Urala*: diss. ... d-ra geol. min. nauk [Hypergenesis of sulfide deposits of the Southern Urals. PhD diss.]. Moscow publ., 2009. 537 p. (In Russ.)
30. Petrov V. P. *Osnovy ucheniya o drevnikh korakh vyvetrivaniya* [Fundamentals of the doctrine of ancient weathering crusts]. Moscow, Nedra publ., 1967. 344 p. (In Russ.)
31. Korobushkina E. D., Korobushkin I. M. Vzaimodeistvie zolota s bakteriyami i obrazovanie «novogo» zolota [Interaction of gold with bacteria and the formation of "new" gold]. *Dokl. AN SSSR – Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 1986, vol. 287, no. 4, pp. 978–980 (In Russ.)
32. Marakushev S. A., Kovalevskaya A. A., Safronov P. P. Bakt'riyal'naya perekristallizatsiya zolota [Bacterial recrystallization of gold]. *Dokl. AN SSSR – Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 1989, vol. 308, no. 2, pp. 482–485 (In Russ.)
33. Marakushev S. A. *Geomikrobiologiya i biokhimiya zolota* [Geomicrobiology and biochemistry of gold]. Moscow, Nauka publ., 1991. 109 p. (In Russ.)
34. Amosov R. A., Vasin S. L. Zoloty mikrofosillii [Gold microfossils]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 1993, no. 3, pp. 101–107 (In Russ.)
35. Kuimova N. G., Zhilin O. V. Biogennaya kristallizatsiya ionnogo zolota mikromitsetami [Biogenic crystallization of ionic gold by micromycetes]. *DAN – Doklady Akademii nauk*, 2002, vol. 386, no. 6, pp. 809–812 (In Russ.)
36. Kalinin Yu. A., Baksheev N. A., Zhmodik S. M., Zhitova L. M. Biogennoe zoloto iz kor vyvetrivaniya i rossypei Salaira [Biogenic gold from weathering crusts and placers of Salair]. *Sovremennye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: materialy Mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoi 110-letiyu so dnya rozhdeniya akad. Konstantina Ignat'evicha Lukasheva (1907–1987)* [Modern problems of geochemistry, geology and prospecting for mineral deposits: Proc. Int. scientific conf., dedicated to the 110th anniversary of the birth of academician Konstantin Ignatyevich Lukashev (1907–1987)]. Vol. 2, part 2. Minsk, BGU, Law and Economics publ., 2017. Part 2. pp. 18–20 (In Russ.)
37. Melchiorre E. B., Orwin P. M., Reith F., Rea M. A. D., Yahn J., Allison R. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA. *Minerals*, 2018, no. 8(56), pp. 1–20.
38. Osovetskiy B. M. Sovremennye gorizonty nanomineralogii zolota [Modern horizons of gold nanomineralogy]. In the book *Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: izuchenie, osvoenie, ekologiya: materialy mezhdunarodnogo soveshhanija* [Placers and deposits of weathering crusts: study, development, ecology: materials conference]. Perm, State national research university publ., 2015, pp. 178–180 (In Russ.)
39. Bozhko E. N., Savko A. D. Zolotonosnost' Birrim'skogo massiva (Zapadnaya Afrika) [Gold-bearing capacity of the Birrim massif (West Africa)]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 33, 2005. 131 p. (In Russ.)
40. Kuznetsova O. Yu. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti zolotonosnykh kor vyvetrivaniya Urala (na primere Svetlinskogo i Katalambinskogo mestorozhdenii)*: avtoref. diss. ... kan. geol. min. nauk [Mineralogical and geochemical features of gold-bearing weathering crusts of the Urals (using the Svetlinskoye and Katalambinskoye deposits as an example). Abstract diss.]. 2000. 19 p. (In Russ.)
41. Artyeva T. A. Mineralogiya zolota kor vyvetrivaniya hrebta Manitanyrd. *Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: sovremennye problemy issledovaniya i osvoeniya: materialy mezhdunarodnogo soveshhanija* [Placeways and deposits of weathering crusts: modern problems of study and development: materials conference]. Novosibirsk, OOO "Apelsin" publ., 2010, pp. 59–64 (In Russ.)
42. Savko A. D., Shevyrev L. T., Ilyash V. V., Okorokov V. A. Geokhimicheskie osobennosti i genezis zolota osadochnogo

- chekhla Voronezhskoi anteklizy [Geochemical features and genesis of gold in the sedimentary cover of the Voronezh antecline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1996, no. 2, pp. 86–95 (In Russ.)
43. Savko A. D., Shevyrev L. T., Loskutov V. V. Ekskalyatsionno-osadochnaya metallonost' Voronezhskoi anteklizy – novye gorizonty poiskov rudnykh mestorozhdenii v osadochnom chekhle. Stat'ya 1. Intermetallidy :lokalizatsiya, tipy, sostav [Exhalation-sedimentary metal content of the Voronezh antecline – new horizons for prospecting for ore deposits in the sedimentary cover. Article 1. Intermetallics: localization, types, composition]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1999, no. 7, pp. 139–154 (In Russ.)
44. Yanchenko O. M., Timkin T. V., Voroshilov V. G., Martynenko I. V., Ziaii M. Morphology and composition of gold in weathering crust of the Tom-yaya interfluv. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhenering georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, 3, pp. 84–92 (In Russ.)
45. Barannikov A. G. Zolotonost' Goginskogo rudno-rossypnogo raiona (Yuzhnyi Ural) [Gold content of the Goginsky ore-placer region (Southern Urals)]. Ekaterinburg, Ural State Mining University publ., 2006. 197 p. (In Russ.)
46. Bogatyrev B. A. Boksity – novyi perspektivnyi vid syr'ya na zoloto [Bauxites – a new promising type of raw material for gold]. *Rossyipi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: sovremennye problemy issledovaniya i osvoeniya: materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya* [Placeways and deposits of weathering crusts: modern problems of study and development: materials conference]. Novosibirsk, OOO "Apelsin" publ., 2010, pp. 107–110 (In Russ.)
47. Chaika V. M. Rifeidy Tsentral'noi Sakhary. [Ripheans of the Central Sahara]. Moscow, Nauka publ., 1979. 174 p. (In Russ.)
48. Mestorozhdenie Tomtor [Tomtor deposit]. Available at: [ru.wikipedia.org/wiki/Tomtor_\(mestorozhdenie\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Tomtor_(mestorozhdenie)). (Accessed 21.10.2024) (In Russ.)
49. Rudnye resursy i ikh razmeshchenie po geoepokham. Redkie metally: tantal, niobii, skandii, redkie zemli, tsirkonii, gafnii [Ore resources and their distribution by geoeepochs. Rare metals: tantalum, niobium, scandium, rare earths, zirconium, hafnium]. Referentse manual. Ed. D. V. Rundqvist. Moscow, Nedra publ., 1995. 223 p. (In Russ.)
50. Tolstov A. V., Konoplev A. D., Kuzmin V. I. Osobennosti formirovaniya unikal'nogo redkometall'nogo mestorozhdeniya Tomtor i otsenka perspektiv ego osvoeniya [Features of the formation of the unique rare metal deposit Tomtor and assessment of the prospects for its development]. *Razvedka i okhrana nedr – Exploration and protection of subsoil*, 2011, no. 6, pp. 20–26 (In Russ.)
51. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Shcherbov A. V., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. Glavnye porodoobrazuyushchie mineraly anomal'no bogatyykh rud mestorozhdeniya Tomptor (Arkticheskaya Sibir') [Main rock-forming minerals of anomalously rich ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115 (In Russ.)
52. Lapin A.V., Kulikova I.M., Nabelkin O.A. Surface Formations on the Weathering Crusts of Carbonatites (To Genesis Problem of Unique Rare-Metal Ores from Tomtor Deposit, Russia). *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and useful minerals*, 2021, no. 4, pp. 364–384 (In Russ.)
53. Tsykina S. V. Zonal'nost' redkometall'nogo orudneniya kory vyvetrivaniya karbonatitov Chuktukonskogo mestorozhdeniya [Zoning of rare metal mineralization of the weathering crust of carbonatites of the Chuktukon deposit]. *Geologiya i mineral'nye resursy Tsentral'noi Sibiri – Geology and mineral resources of Central Siberia*. I. 4. Krasnoyarsk, KNIIGiMS publ., 2003, pp. 153–158 (In Russ.)
54. Kolotukhina S. E. *Strukturnoe polozhenie redkometall'nykh provintsii na drevnikh platformakh Yuzhnogo polushariya* [Structural position of rare metal provinces on ancient platforms of the Southern Hemisphere]. Moscow, Nauka publ., 1975, 87 p. (In Russ.)
55. Regolith-hosted rare earth element deposits. Available at: en.wikipedia.org/wiki/Regolith-hosted_rare_earth_element_deposits (accessed 21.10.2024)
56. Teitler Y. M., Cathelineau M., Ulrich, Ambrosi J.P., Munoz M., Sevin B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 196, pp. 131–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2018>

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.