

Эволюция бокситонакопления в фанерозое

©2022 А. Д. Савко[✉], М. Ю. Овчинникова

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

Аннотация

Введение: Бокситы являются основным сырьём для получения алюминия. Они связаны с формацией коры выветривания (ФКВ) и представлены латеритами, а также коллювиальными, делювиально-пролювиальными, карстовыми, аллювиальными и озерно-болотными образованиями. Различным аспектам геологии бокситов посвящены сотни публикаций многих авторов, в том числе по эволюции бокситонакопления. В этих работах были выделены различные эпохи бокситонакопления, и преобладал актуалистический подход («настоящее – ключ к прошлому»). Однако признание эволюции требует рассмотрения специфики каждой из эпох в зависимости от смен тектонических режимов и климатов, а также влияния органики на выветривание. Эти аспекты рассмотрены в статье.

Методика и объёмы работ: Основными методами исследований были сравнительно-литологический и историко-геологический. Большое внимание уделялось перерывам в осадконакоплении, когда могли формироваться латеритные КВ. Такие времена отвечают эпохам бокситообразования. Необходимо было выявление особенностей каждой для установления эволюции бокситонакопления в фанерозое. При написании настоящей статьи авторы опирались на фактический материал из трехтомника «Историческая минерагения» [1] и монографии [2]. Между тем мировая минерагения стремительно обновляет свою фактологическую базу. Поэтому по возможности использованы материалы из различных источников по состоянию на 2021 год, включающих данные по многочисленным месторождениям бокситоносной ФКВ Мира.

Результаты исследований и их обсуждение: Первые бокситы фанерозоя появились в раннем кембрии в единичных участках складчатых поясов при их пенепленизации. В эйфельском веке образовались промышленные месторождения высокого качества на Северном Урале. Во франское время бокситонакопление расширилось на территорию Среднего Тимана. Количество известных девонских месторождений не превышают двух десятков, а их общие запасы составляют порядка одного млрд тонн. В раннекаменноугольное время бокситонакопление сместилось на докембрийские платформы Северного полушария, а в их пределах – в периферийные части угленосных бассейнов. Оно продолжалось в среднем карбоне на Китайской и Северо-Американской платформах, а на территории Кореи вплоть до ранней перми. Формирование бокситов происходило в латеритную, диагенетическую и эпигенетическую стадии; в последнюю в случаях перекрытия бокситов угленосными отложениями. Активное участие в выветривании принимала органика с образованием бактериальных биоморфов. Резко возросло количество месторождений (сотни) и увеличились их общие запасы до 4 млрд тонн. Месторождения мезозойских бокситов тяготеют к складчатым поясам, а в их пределах к эпигерцинским и эпикиммерийским молодым платформам Северного полушария. Преобладает карстовый тип бокситов. Они имеют гиббсит-бемитовый состав у плат-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

форменных разновидностей и диаспор-бемитовый в подвергшихся складчатости участках. На докембрийских платформах преобладали низменные обводненные ландшафты с теплым гумидным климатом и каолиновыми КВ. Насчитывается более 1000 месторождений мезозойских бокситов, однако, большинство из них мелкие, хотя качество сырья высокое. Общие запасы глинозема мезозойских бокситов (3.3 млрд тонн) несколько меньше палеозойских, но месторождений больше. Бокситонакопление в кайнозой приняло грандиозные масштабы. Это связано с расширением площадей выравненной суши с тропическим климатом, относительно высоким стоянием материков, их дроблением и увеличением прибрежных территорий с большим количеством осадков, обилием органики. Всё это привело к образованию мощных латеритных кор выветривания со многими крупными и суперкрупными месторождениями бокситов. Заметная доля в общих запасах приходится на месторождения островных дуг, но основные сосредоточены на материках бывшей Гондваны, особенно в Западной Африке и северо-востоке Южной Америки. При этом формировались латеритный, латеритно-осадочный и карстовый типы КВ гиббситового и бемит-гиббситового состава.

Заключение: В целом же в течение фанероза эволюция бокситонакопления имела пульсационно-направленный тренд, выраженный в неравномерном увеличении площадей и запасов этого вида сырья со временем.

Ключевые слова: эволюция, бокситы, кора выветривания, латериты, гиббсит, бемит, диаспор.

Для цитирования: Савко А. Д., Овчинникова М. Ю. Эволюция бокситонакопления в фанерозе // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. №1. С. 4–33. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9096>

Введение

Бокситы являются основным сырьём для получения алюминия. Они связаны с формацией коры выветривания (ФКВ) и представлены латеритами, а также коллювиальными, делювиально-пролювиальными, карстовыми, аллювиальными и озерно-болотными образованиями. Две последние разновидности иногда объединяют в общую, долинную. Различным аспектам геологии бокситов посвящены сотни публикаций многих авторов. В первую очередь это работы А.Д. Архангельского, В.И. Белоусова, С.И. Бенеславского, Д. Бардоши, Е.Т. Боброва, Б.А. Богатырева, В.А. Броневого, Ю.Ю. Бугельского, Г.И. Бушинского, И. Валетон, С.Г. Вишнякова, Н.А. Лисициной, В.И., Мамедова, Б.М. Михайлова, А.П. Никитиной, В.М. Новикова, Б. Н. Одокия, Р.С. Родина, М.В. Пастуховой, Д.Г. Сапожникова, В.И. Сиротина, А.Д. Слукина, В.А. Тенякова, Ю.Г. Цеховского, Ф.В. Чухрова, В.Б. Шишакова, В.С. Шуба, О. Шумова, В.П. Шатрова, М.Г. Эдлина, Я.Э. Юдовича, Н.А. Ясаманова, Б.А. Яцкевича и многих других.

Пик публикаций пришелся на 60–80-е годы прошлого столетия. Тогда были широко развернуты поиски глиноземного сырья в связи с возрастающими потребностями в алюминии для различных отраслей промышленности. Это особенно важно было для нашей страны, не имеющей значительных запасов бокситов. В последующие годы поток публикаций резко снизился. Вместе с тем появились крупные работы А.Д. Слукина [3], Б.А. Богатырева [4], В.М. Новикова [5], Б.В. Шибистова [6], В.И. Мамедова с соавторами [7, 8], в которых приведены результаты изучения бокситоносности на различных континентах Земли.

В результате исследований были установлены латеритный, осадочный и карстовый типы бокситов. Нами вместо осадочного выделены латеритно-осадочный и осадочно-диагенетический типы. По минеральному

составу установлены гиббситовые, бемитовые, диаспоровые и их смешанные разновидности. Основными примесями являются оксиды железа и каолинит. При наложенных процессах (диагенез, эпигенез, метаморфизм) появляются шамозит, хлорит, корунд и другие минералы.

Эволюция бокситонакопления была рассмотрена в публикациях Г.И. Бушинского [9], Б.М. Михайлова [10], Б.А. Богатырева, В.И. Жукова [11], А.Д. Савко и др. [2], А.Д. Савко [12], Б.А. Богатырева и др. [13]. Характеристики бокситов различного возраста приведены в работах Д. Бардоши [14], Д.Г. Сапожникова [15, 16], Б.М. Михайлова [17], А.П. Никитиной и др. [18], Ясаманов Н.А. [19]. В результате было установлено, что основные запасы бокситов образовались в фанерозе, в течение которого выделены эпохи, благоприятные для формирования этого вида минерального сырья. Под термином эпохи понимаются интервалы времени различной длительности. Их количество и длительность у разных авторов неодинаковые, но все сходятся в признании наиболее масштабного бокситообразования в кайнозой (до 80% всех запасов). Одни исследователи, не объясняя причин, это просто констатируют, другие считают, что в более древние времена оно было не менее интенсивным, но затем бокситы были размыты [20, 21]. Такое предположение не подтверждено фактическим материалом и требует дополнительного анализа.

За последние полтора десятка лет появились новые количественные данные по месторождениям бокситов в различных регионах. В результате общие запасы этого вида сырья, в том числе прогнозные, возросли с немногим более 30 до 100 с лишним млрд тонн. Поэтому возникла необходимость внесения корректировок в распределение запасов по эпохам для учета их вклада в эволюцию бокситонакопления, особенно в докайнозойское время.

Образование бокситов определяется рядом факторов. Основными из них являются климатический, тек-

тонический, действующий через рельеф, и биологический. Необходимым условием для образования месторождений является наличие глинозема в материнском субстрате коры выветривания (КВ), обычно в виде алюмосиликатов. В течение фанерозоя, как и ранее, указанные выше факторы эволюционировали [12], что, несомненно, сказывалось на количественном и качественном составе месторождений бокситов. В работах по ним преобладал актуалистический подход («настоящее – ключ к прошлому» и «мы не находим никаких следов начала и никаких перспектив конца» по Ч. Лайелю). Признание эволюции требует рассмотрения специфики каждой из выделенных эпох в зависимости от смен тектонических режимов и климатов.

Сами бокситы являются литологическими индикаторами теплого гумидного климата и образуются в условиях тропических и субтропических зон [19, 22, 23]. По приуроченности к определенным тектоническим структурам выделялись бокситы платформенных и складчатых областей [4, 24]. Более подробная классификация предложена в работе Б.А. Богатырева и В.В. Жукова [20]. Она включает наличие следующих структур, в пределах которых могли формироваться бокситы: 1. Древние платформы гондванского и лавразийского типов; 2. Молодые платформы; 3. Активизированные континентальные окраины; 4. Складчатые области; 5. Островодужные области; 6. Крупные щитовидные вулканы.

Эта классификация является шагом вперед в определении бокситоносных структур, но нуждается в уточнении. Так отнесение Индокитайской области к активизированной окраине ошибочно, поскольку на всех тектонических картах это молодая эпимезозойская платформа, подвергнутая дейтерогенезу в неогене. Скорее к активизированным континентальным окраинам согласно глобальной тектонике плит следует относить островодужные области и щитовые вулканы. Не объяснено, чем в тектоническом плане разнятся типы гондванских и лавразийских платформ, имеющих докембрийский фундамент и осадочный чехол.

Ещё в 1975 г. Г.И. Бушинский писал о неясной роли органического мира в формировании бокситов. В последние два десятилетия вышло в свет значительное количество работ, посвященных влиянию биоса на выветривание, в том числе на латеритное [25–32 и др.]. Но сравнительного анализа роли биоса по эпохам бокситонакопления в целом для фанерозоя сделано не было.

Выше перечисленные нерешенные вопросы определили постановку основной цели настоящей работы – выявление эволюции бокситонакопления в фанерозойской истории Земли на основе имеющихся опубликованных и собственных материалов. Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

1. Рассмотреть пространственное распределение месторождений бокситов и их запасов по возрасту в фанерозойской истории Земли;
2. Охарактеризовать эпохи бокситонакопления в фанерозое с использованием новых материалов;

3. Изучить приуроченность бокситообразования к определенным тектоническим структурам;

4. Исследовать распределение генетических типов бокситов и их минеральный состав в различные эпохи фанерозоя;

5. Выявить влияние органики на бокситообразование в течение фанерозоя;

6. Установить для каждой из выделенных эпох особенности образования глинозема и их изменение во времени для обоснования эволюции бокситонакопления в течение фанерозоя.

Методика исследований и фактический материал

Основными методами исследований были сравнительно-литологический и историко-геологический. Поскольку основная масса бокситов образовалась в континентальных условиях, то большое внимание уделялось перерывам в осадконакоплении, когда могли формироваться латеритные коры выветривания (КВ). Такие времена отвечают эпохам бокситообразования. Помимо их привязки к стратиграфической шкале необходимо было выявление особенностей каждой из них для установления эволюции бокситонакопления в фанерозое. Специфика выражалась в том, что в зависимости от ландшафтных условий на сходных по составу материнских породах могли формироваться различные типы бокситов и их месторождений.

Эпохи бокситообразования в геологической истории Земли обычно отвечают длительным континентальным перерывам, связанных с временами тектонических перестроек, выравниванием рельефа, изменениями климатов, развитием растительного и бактериального биосов. Они прямо или косвенно после отмирания в виде гуминовых кислот резко ускоряют разложение материнских пород и формирование элювия. Именно в эти эпохи образовалось большинство месторождений ФКВ. Путем подсчета заключенных в них запасов бокситов строилась эволюционная диаграмма их изменения в фанерозое

При её составлении учитывались следующие соображения. КВ образуются обычно на положительных структурах и легко размываются. Следовательно, часть древних месторождений могла быть уничтожена эрозией. В некоторых складчатых поясах они подверглись процессам метаморфизма и ресилификации. Существуют также еще не открытые аккумуляции бокситов в древних толщах. Поэтому условно на шкале запасов для палеозойских и мезозойских бокситов были введены повышающие коэффициенты 2 и 1.5 соответственно.

При написании настоящей статьи авторы опирались на фактический материал из трехтомника «Историческая минерагения» [1] и монографии [2]. Между тем мировая минерагения стремительно обновляет свою фактологическую базу. Поэтому в настоящей работе по возможности использованы материалы из различных источников по состоянию на 2021 г., включающих данные по многочисленным месторождениям бокситоносной ФКВ Мира. Особенно обшир-

ные данные приведены в работах Б.А. Богатырева и В.И. Мамедова с соавторами.

Результаты исследований

Месторождения бокситов широко распространены на континентах, но разобщены по возрасту. Палеозойские аккумуляции развиты в Евразии в виде широкой полосы от её северо-западной части до Китая и Кореи включительно (рис. 1). Здесь располагались зоны тропического и субтропического климатов, благоприятных для концентрации глинозема. По направлению с северо-запада на юго-восток происходило омоложение возраста месторождений. На севере Урала они средне-, южнее и на Тимане – верхнедевонские, на северо-западе и в центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП) – нижнекаменноугольные.

В Китае появляются средне- и верхнекаменноугольные, а также и нижнепермские разности. Это

результат миграции со временем благоприятных для бокситообразования климатических зон. Так в районе озера Балхаш (Казахстан) в разрезах нижней перми эвапоритовые отложения аридного климата снизу вверх сменяются угленосными гумидного. Уже на Алтае и восточнее образования балахонской свиты (P₁) слагают угленосные бассейны Южной Сибири, свидетельствующие там о гумидном климате в раннепермское время.

Бокситы мезозоя распространены в Евразии на территориях Средней и Южной Европы, Турции, Ирана, Сирии, севере Индии, южном окаймлении Сибири, Казахстана и Средней Азии. Они тяготеют к северной части Средиземноморского складчатого пояса, развиты на эпипалеозойских и эпикиммерийских платформах, меньше на кристаллическом фундаменте докембрия (Украинский щит). Большинство разведанных месторождений расположено в Западной Европе.

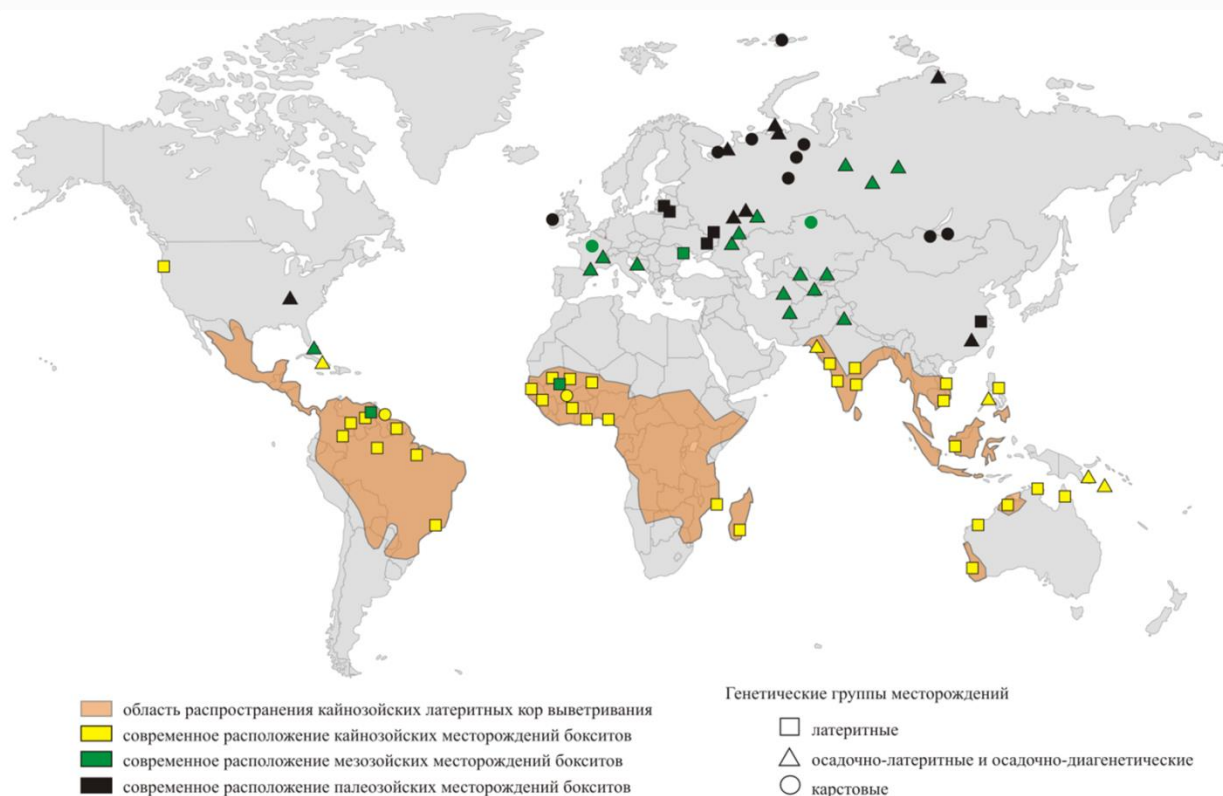


Рис. 1. Распространение бокситов на территории континентов Мира с использованием данных из работы [13].
[Fig. 1. The distribution of bauxites on the territory of the continents of the world after [13].]

Месторождения бокситов кайнозоя находятся в пределах материков бывшего суперконтинента Гондваны, в Центральной Америке, на юге США и в Средиземноморском складчатом поясе (см. рис. 1). Основные запасы глинозема в десятки миллиардов тонн сосредоточены на территориях древних платформ (Южная Америка, Африка, Индия, Австралия).

Общие запасы бокситов свыше 100, подтвержденные – около 30 млрд тонн [33]. На схеме распределения запасов бокситов фанерозоя (рис. 2) выделяются

раннекембрийская, эйфельско-франская, визейско-раннепермская, позднепермская, позднепермско-раннеюрская, раннемеловая, (максимум в апте-альбе) и палеоген-четвертичная (максимум в эоцене).

Раннекембрийская эпоха. Бокситы этой эпохи обнаружены в нескольких точках Сибири, Алтая, Монголии, Восточного Саяна [1]. В настоящее время разведано Боксонское месторождение низкокачественных железистых диаспор-бемитовых бокситов карстового типа (рис. 3). Оно расположено в Бурятии, в

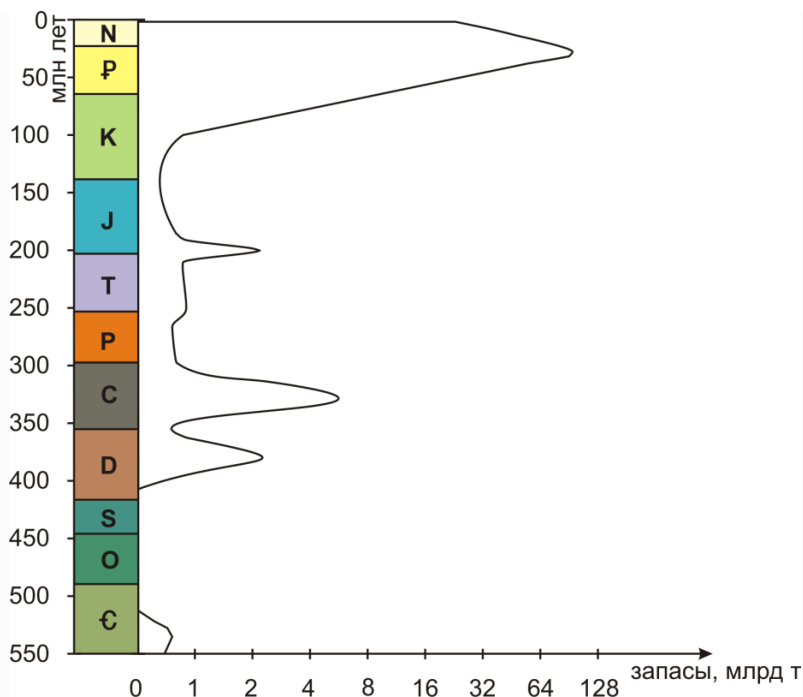


Рис. 2. Схема распределения запасов бокситов в фанерозое.
 [Fig. 2. The scheme of bauxite reserves' distribution in the Phanerozoic.]

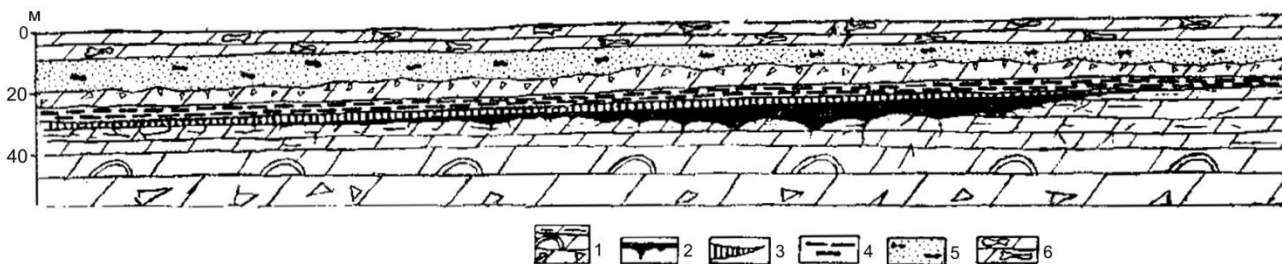


Рис. 3. Схема строения бокситоносной формации в районе Боксонского месторождения [17]: 1 – доломиты брекчированные, водорослевые, мергелистые; 2 – бокситы, аллиты; 3 – сланцы вишнево-коричневые, зеленые; 4 – сланцы черные графитистые; 5 – песчаники кварцевые и сланцы с фосфоритами; 6 – доломиты темно-серые с кремнями.
 [Fig. 3. The scheme of the structure of the bauxite-bearing formation in the area of the Bokson field [17]: (1) – brecciated, algal, marl-like dolomites; (2) – bauxites, allites; (3) – cherry-brown, green shales; (4) – black graphite shales; (5) – quartz sandstones and shales with phosphorites; (6) – dark grey dolomites with cherts.]

юго-восточном Саяне. В рудном поле Боксонского месторождения в толще доломитов был вскрыт бокситовый горизонт с изменяющейся мощностью от 0 до 35 м, который горными выработками и колонковыми буровыми скважинами прослежен на протяжении 33 км; в бокситовом горизонте (пласте) выделено 17 рудных участков [34].

По данным работы [35] помимо бемита, среднее, % (23.79) и диаспора (12.35), породообразующими минералами бокситов являются гематит (20.80), иллит (17.80), каолинит (8.04). В незначительных количествах присутствуют пироксен, хлорит, пирофиллит, смектит. По результатам химических анализов среднее содержание глинозема 42.58%, кремнезема 18.07 %, оксидов титана и кальция чуть больше 2%, щелочей натрия и калия каждого около одного процента.

Эйфельско-франкская эпоха. Бокситоносная ФКР

нижнеэйфельского возраста, развитая на закарстованных нижнедевонских органогенных известняках с прослоями сланцев и вулканогенных пород, известна на Восточном склоне Урала. Её месторождения карстового типа образуют Северо-Уральский бокситоносный район (СУБР), протягивающийся в меридиональном направлении на 150 км при ширине 2–4 км. Бокситам СУБР посвящена обширная литература, основополагающей из которой являются работы Г. И. Бушинского [9] и Б. М. Михайлова [17].

Бокситовый бассейн разделяется широтными сбросами и безрудными промежутками на ряд крупных площадей, которые условно названы месторождениями: Красная Шапочка (рис. 4), Кальинское, Черемуховское, Каслинское, Карпинское, Сосьвинское, Всеволодо-Благодатское. Разведанные запасы составляют порядка 200 млн тонн, столько же и прогнозные [20].

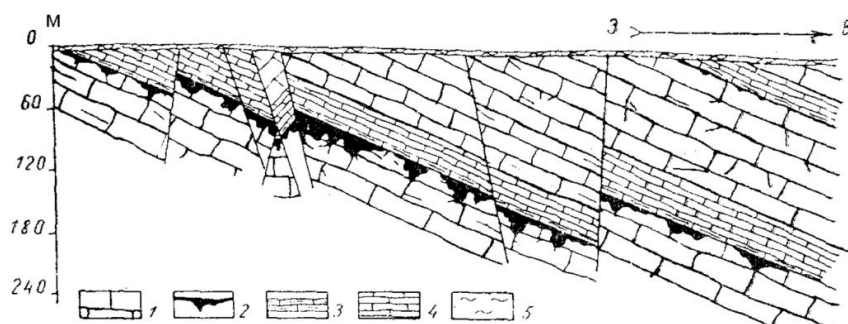


Fig. 4. The section of the Krasnaya Shapochka field (Northern Urals) [17]. (1) – massive pink-white limestones (D₂); (2) – bauxites; (3) – marls, black mudstones; (4) – grey amorphous limestones (D₂); (5) – sandy loam and loam (Q).]

Рис. 4. Разрез месторождения Красная Шапочка (Северный Урал) [17]. 1 – известняки массивные розово-белые (D₂); 2 – бокситы; 3 – мергели, черные аргиллиты; 4 – серые амфипоровые известняки (D₂); 5 – супеси и суглинки (Q).

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

Формирование рассматриваемых бокситов, по мнению Г.И. Бушинского [9], происходило в условиях тропического жаркого климата. Западнее СУБР простиралась гряда островов, сложенных основными породами. Латеритная КВ на них размывалась, её материал сноился в закарстованные понижения, где и отлагался в виде боксита. Затем они были перекрыты карбонатными толщами эйфельского и живетского возраста.

Крупные, хорошо стратифицированные месторождения, образованные в раннефранской КВ по рифейским терригенно-карбонатным породам и туфам девона, известны на Среднем Тимане. Пласт бокситов обычно подстилается каолиновыми глинами, а перекрывается базальтами, песчаниками и глинами нижнего франа. Мощность рудного слоя колеблется от первых до 50, средняя 6–7 м. Они имеют преимущественно красный цвет (рис. 5), пелитоморфные, пористые, нередко сохраняют реликтовую текстуру рифейских сланцев, реже туфов [36].

Разведаны Ворыквинская и Заостровская группы месторождений с общими запасами порядка 500 млн тонн. Месторождения расположены в пределах пенепленизированных каледонид, относятся к латеритному типу (рис. 6). Бокситоносная ФКВ сложена элювием, делювиально-пролювиальными и озерно-болотными отложениями. Руды Заостровской группы комплексные фосфат-бокситовые (P₂O₅ 0.5–23.0%). Фос-



Рис. 5. Разработка бокситов на Вежаю-Ворыквинском месторождении [37].

Fig. 5. Bauxite development in the Vezhau-Voryksinskoe field [37].]

фор при выветривании заимствовался из черных сланцев рифейского субстрата (P₂O₅ 0.5–23.0%).

Бокситы железистые, содержание: (%) Al₂O₃ – 34–78 (среднее 48.64), SiO₂ – 1.5–25.0 (8.06), Fe₂O₃ – 1.0–37 (27–87%) [36]. Изредка встречаются обеленные наложенными процессами разности, особенно на Светлинском месторождении Ворыквенской группы.

Среднее значение кремниевого модуля колеблется в широких пределах – от 2.4 до 11.93 [38], в отдельных случаях до 60 в отбеленных разностях бокситов. На качество бокситов оказывают влияние вторичные процессы каолинизации, шамозитизации, карбонатизации, пиритизации, «отбеливания» (вынос железа) [39, 40].

Главные минералы представлены бемитом, гематитом, бертьерином и каолинитом, второстепенные – иллит, монтмориллонит, диаспор, шамозитом акцессории. На Володинском месторождении Заостровской группы основным минералом глинозема является диаспор. Преобладающий тип бокситов железисто-бемитовый. По минеральному составу выделяются следующие разновидности [36]: гематит-каолинит-бёмитовые, гематит-бёмитовые, гематит-шамозит-бёмитовые, диаспор-каолинит-гематит-бёмитовые и диаспор-шамозит-гематит-бёмитовые. Но скорее всего за шамозит принимается бертьерин (у них близкие оптические и рентгенометрические параметры), поскольку первый является наложенным и не может быть породообразующим минералом [41, 42].

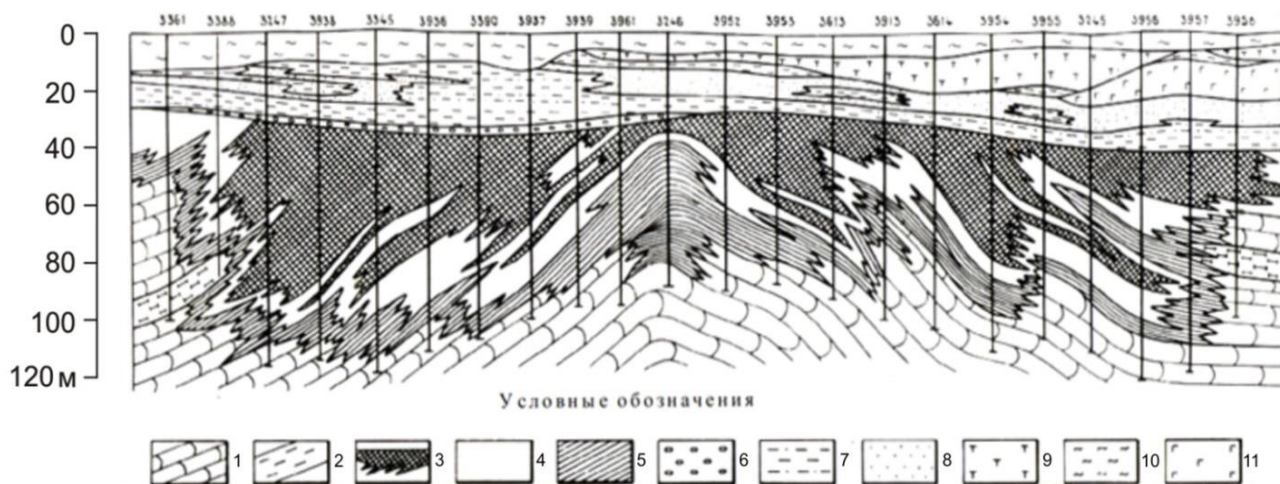


Рис. 6. Геологический разрез по одной из залежей Верхне-Щугорского месторождения (Ворыквинская группа): 1 – полевошпат-карбонатные сланцы; 2 – мергели и известковистые сланцы; 3 – бокситы; 4 – аллиты; 5 – коаилинизированные продукты выветривания метасоматитов; 6 – делювиально-пролювиальные бокситы; 7 – глины и алевролиты; 8 – песчаники; 9 – туфы и туффиты; 10 – четвертичные отложения; 11 – субинтрузии основного состава [24].

[Fig. 6. The geological section across one of the deposits in the Verkhne-Shchugorskoe field (Vorykvin group): (1) – feldspar-carbonate shales; (2) – marls and calcareous shales; (3) – bauxites; (4) – allites; (5) – kaolinised products of metasomatites' weathering; (6) – deluvial-proluvial bauxites; (7) – clays and siltstones; (8) – sandstones; (9) – tuffs and tuffites; (10) – Quaternary deposits; (11) – subintrusions of the main composition [24].]

Помимо бокситов Среднего Тимана сведения о них для рассматриваемого временного интервала в других регионах крайне скудны. По данным работы [13] месторождения раннефранского возраста имеются на Урале, где они расположены как на западном, так и восточном его склонах. При этом имеются непрерывные разрезы, в которых насчитывается до шести бокситоносных горизонтов (Петровское месторождение) ниже- и верхнеэфельского, живетского, франского возраста. В этой работе также вскользь указывается наличие девонских бокситов в Северной Испании, на Гиндукуше, в Корее и Северной Америке. Разведанные запасы рассматриваемой эпохи составляют порядка 600, прогнозные 300 млн тонн [20].

Каменноугольно-раннепермская эпоха. Её месторождения развиты в широкой полосе, включающей Северную часть Западной Европы, Восточно-Европейскую платформу, Среднюю Азию, Китай и Корею (см. рис. 1), Аппалачские горы в США. Большинство аккумуляций глинозема имеют нижнекаменноугольный возраст и только на Северо-Китайской платформе появляются средне-верхнекаменноугольные, а также раннепермские бокситы. ФКВ развита на различных по составу кристаллических и осадочных алюмо-силикатных породах, а также карбонатных, тяготеет обычно к повышенным участкам расчлененного рельефа платформенных структур [2, 12]. Наибольшее число месторождений разведано на ВЕП, где выделяются Белгородский, Тихвинский, Северо-Онежский, Южно-Тиманский бокситоносные районы.

В пределах Белгородского района [43] бокситы развиты в КВ слюдистых сланцев, залегающих среди железистых кварцитов, по которым в результате

выветривания образовались богатые железные руды (рис. 7). При значительном содержании в сланцах минералов железа в КВ образуются алюмо-железные руды.

По морфологии рудных тел бокситов выделяются площадные, линейно-площадные, линейно-контактовые и карстовый типы, причем последний установлен на участках развития кварц-мусковит-карбонатных сланцев и карбонат-слюдисто-магнетитовых джеспилитов материнского субстрата [45].

Основными породообразующими минералами являются бемит, гиббсит, бертьерин, каолинит, гематит, гетит, второстепенными – диаспор, шамозит, сидерит, кальцит, хлорит, сульфиды, акцессории. По соотношению породообразующих выделяют гиббсит-бемитовые, бертьерин-бемитовые, каолинит-гиббсит-бемитовые и другие разновидности. Второстепенные минералы, как правило, бывают наложенными и к ним могут добавляться каолинит и бертьерин. В литературных источниках наличие в КВ бертьерина, который является железистым аналогом каолинита, связывают с наложенными (диагенетическими) процессами. Считается, что он не может формироваться в субаэральных условиях [43]. По нашим же данным, бертьерин при насыщении железом среды выветривания в ассоциации с богатыми железными рудами, является естественным промежуточным сингенетическим минералом. Его наибольшие количества тяготеют к средним частям бокситовых залежей [46]. Установлено, что обычно гиббситовые разновидности тяготеют к повышенной северной части Белгородского района, а бемитовые – к его южной пониженной. Резервы глинозема в бокситах КМА составляют порядка 600 млн тонн [20].

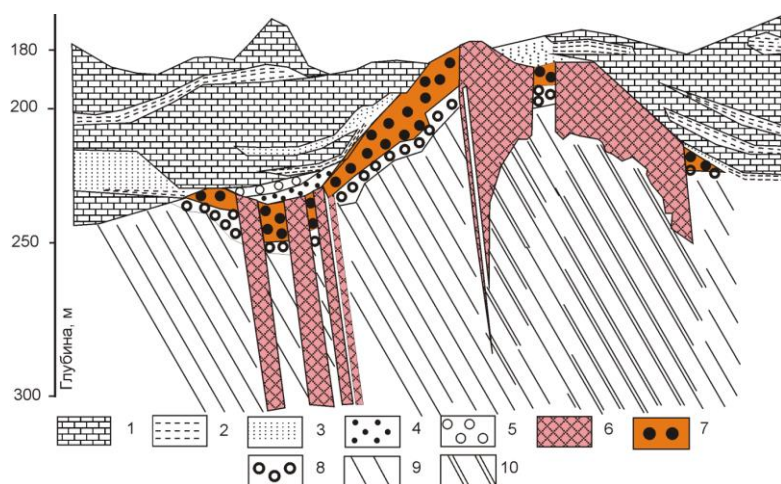


Рис. 7. Геологический разрез Ольховатского месторождения. По материалам [44]: 1 – известняки органо-генно-обломочные, 2 – глины, 3 – алевриты, 4 – аллиты перетолженные, 5 – железорудная конглобрекция, 6 – богатые железные руды, 7 – бокситы, 8 – аллиты, 9 – железистые кварциты, 10 – сланцы и алеврофиллиты.

[Fig. 7.] The geological section of the Olkhovatskoye field. Based on [44]: (1) – bivalve limestones, (2) – clays, (3) – aleurites, (4) – redeposited allites, (5) – iron ore conglomeration, (6) – high-grade iron ores, (7) – bauxites, (8) – allites, (9) – banded iron formations, (10) – shales and silty phyllites.]

На северо-западе ВЕП расположены Тихвинский (смежные территории Ленинградской и Вологодской областей) и Северо-Онежский (Архангельская область) бокситоносные районы. В пределах первого бокситы развиты по девонским глинам, второго – не только по ним, но и базитам и гипербазитам протерозоя Ветреного Пояса. Формирование рудных тел происходило на изрезанных долинами поднятиях, возвышающихся над окружающими равнинами на 70–100 м. Глубина вреза долин 10–30, реже больше 100 м [24].

Как показано в цитируемой выше работе, бокситовые породы Тихвина накапливались в течение тульского времени на вершинах мелких ложбинообразных долин за счет переноса с водораздельных пространств и перетолжения в этих долинах пород КВ девонских отложений. В настоящее время запасы района (до 50 млн тонн) большей своей части отработаны.



Рис. 8. Карьер Западного участка Беловодской залежи Икшинского месторождения [50].

[Fig. 8.] A Quarry in the Western section of the Belovodskaya deposit of the Ikhsinsky field [50].

В Северо-Онежском районе разведано Икшинское, Плещеекое и Дениславское месторождения с общими запасами свыше 400 млн тонн. Наиболее крупное первое включает шесть залежей. Самая мощная (до 18 м) из них Беловодская залежь (рис. 8) представлена

крупным пластообразным субгоризонтальным телом, ее длина 13 км, ширина 2–2.5 км [47].

Формирование залежей (рис. 9) началось в алексинское время [48, 49]. Речными водами и временными потоками с водораздельной поверхности и со склонов Ветреного Пояса сносились продукты разрушения КВ глин и основных пород и отлагались в котловинах у их подножия, образуя делювиальный шлейф, шириной до 20 км, прослеживаемый вдоль склона поднятия на весьма большом протяжении. В котловинах-ловушках по делювиальным отложениям результате «проточного диагенеза» [9] образовались бокситы.

По данным работы [49] в незатронутых проточными процессами отложениях шлейфа аллиты сложены каолинитом, гематитом, серицитом, гиббситом, содержат аллохтонные растительные остатки, нередко минерализованными. При этом в обломках отмечаются бурые гиббситовые латериты, а цемент представлен каолиновым гелем с примесью гематита, гиббсита и бертьерина. Бокситы, развитые по аллитам, имеют каолинит-бемитовый состав с примесью оксидов железа и бертьерина. Всё это свидетельствует о схожести генезиса каменноугольных бокситов КМА и Северо-Запада ВЕП.

На северо-востоке ВЕП нижнекаменноугольные бокситы Южного Тимана (250 млн тонн) приурочены к терригенным отложениям тульского горизонта нижнего карбона. Последние залегают на закарстованной поверхности турнейских или фаменских известняков, а перекрываются карбонатными породами визейского яруса. По данным работы [24] в разрезе терригенной толщи 4 пачки (рис. 10): подбокситоносная, распространенная не повсеместно, бокситоносная, угленосная и пестроцветная.

Бокситоносная пачка (3–14 м) залегают непосредственно на известняках. В ней выделяются следующие типы бокситов: делювиальные (красно-бурые), озерно-болотные (серые), карстовые (пестроцветные) и инфильтрационно-осадочные (внизу красные,верху серые). В последних отмечается обогащение пород глиноземом при инфильтрации восстановительно-кислых вод из залегающей выше угленосной пачки.

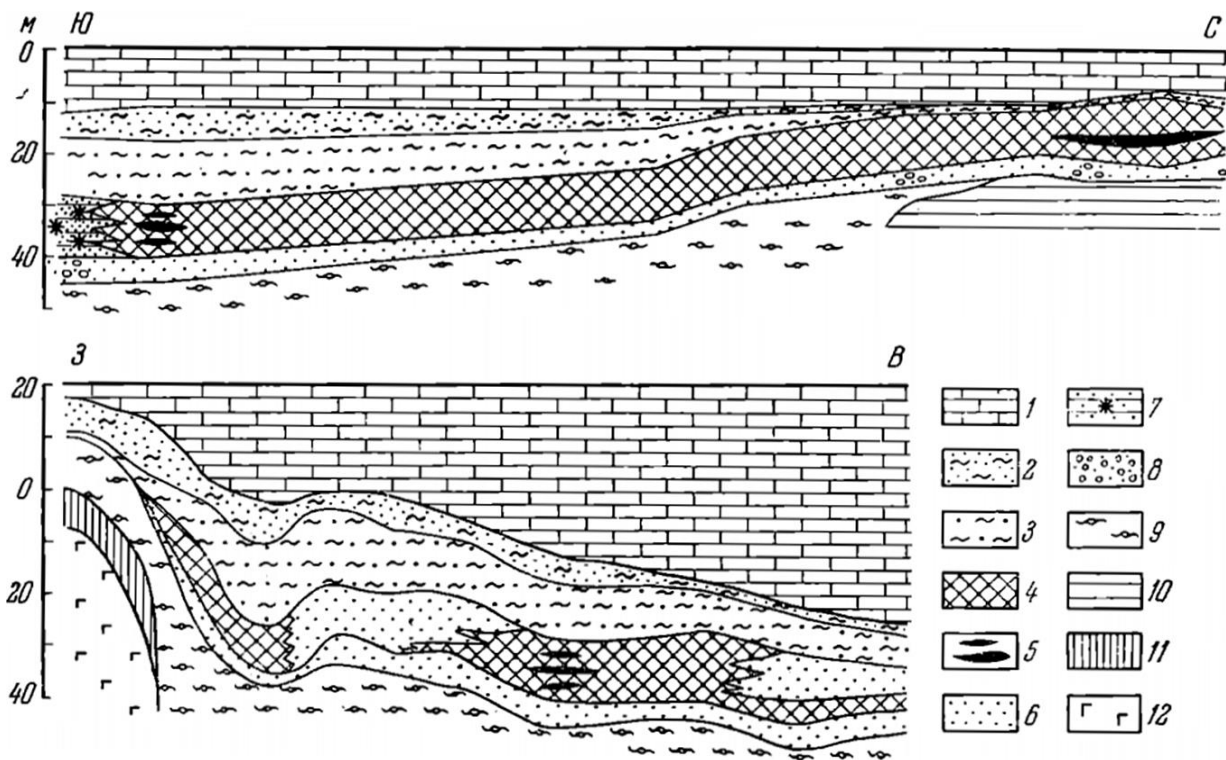


Рис. 9. Геологические разрезы Северо-Онежского района: 1 – известняки среднего и верхнего карбона; нижний карбон; 2 – песчано-глинистые породы веневско-стешевского горизонта; 3 – железенные глины михайловского горизонта; тульско-алексинский горизонт; 4 – бокситовые породы; 5 – бокситы; 6 – каолиновые пески; 7 – песчаники с цеолитами; 8 – обломки кварца; 9 – песчано-глинистые породы девона; 10 – аргиллиты нижнего кембрия; 11 – кора выветривания; 12 – основные породы среднего протерозоя [24].

[**Fig. 9.** Geological sections of the North-Onega region: (1) – limestones of the Middle and Upper Carboniferous; Lower Carboniferous; (2) – sandy-clay rocks of the Venevsko-Steshevsky horizon; (3) – iron-rich clays of the Mikhailovsky horizon; Tula-Aleksinsky horizon; (4) – bauxite rocks; (5) – bauxites; (6) – kaolinite sands; (7) – sandstones with zeolites; (8) – fragments of quartz; (9) – Devonian sandy-clay rocks; (10) – Lower Cambrian mudstones; (11) – weathering crust; (12) – basic rocks of the Middle Proterozoic [24].]

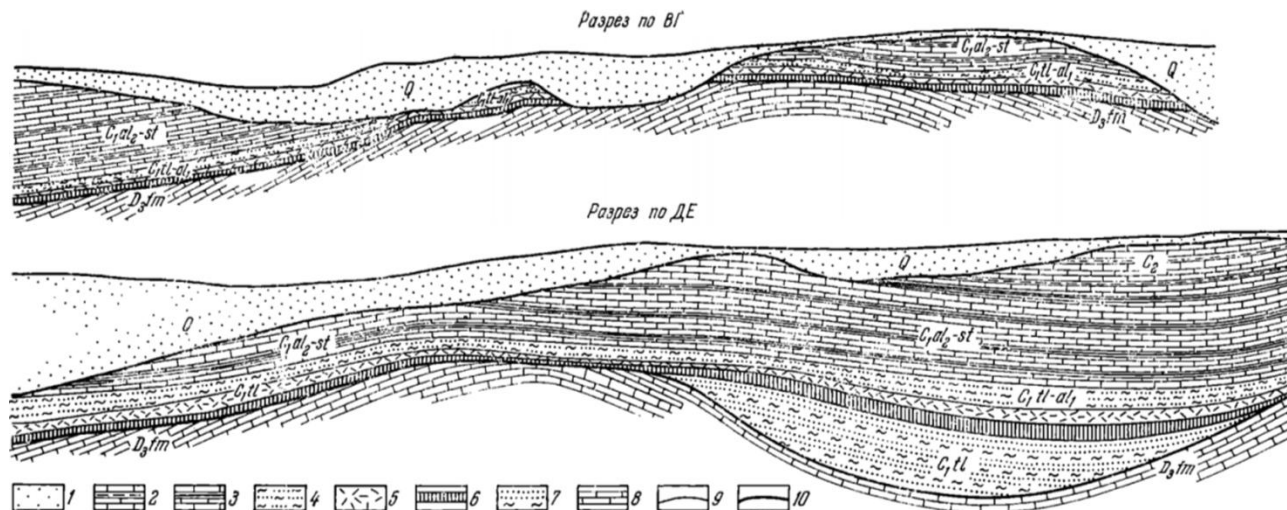


Рис. 10. Геологические разрезы бокситов Южного Тимана. Составил Ю. К. Крылов: 1 – четвертичные отложения, 2 – глинисто-карбонатные отложения среднего карбона, 3 – известняки и глины верхнеалексинского-сташевского горизонтов, 4 – пестроцветная пачка нижнеалексинского-тульского горизонтов. Отложения пачки тульского горизонта: 5 – угленосная, 6 – бокситоносная, 7 – подбокситоносная, 8 – известняки с прослоями фаменского яруса верхнего девона, 9 – границы согласного залегания слоев, 10 – границы стратиграфических несогласий и размывов [24].

[**Fig. 10.** Geological sections of South Timan bauxites. Compiled by Yu. K. Krylov: (1) – Quaternary deposits; (2) – clay-carbonate deposits of the Middle Carboniferous; (3) – limestones and clays of the Upper Aleksinsky-Stashevsky horizons; (4) – variegated member of the Lower Aleksinsky-Tula horizons. Deposits of the Tula horizon member: (5) – coal-bearing; (6) – bauxite-bearing; (7) – sub-bauxite-bearing; (8) – limestones with interbeds of the Famennian stage of the Upper Devonian; (9) – boundaries of regular bedding; (10) – boundaries of stratigraphic nonconformities and erosion [24].]

По минеральному составу бокситы каолинит-бемитовые, реже гематит-каолинит-бемитовые, каолинит-гипсбитовые, каолинит-бемит-гипсбитовые. Второстепенными минералами являются кальцит, сидерит, пирит, иллит, бертьерин. Такой состав обусловлен полигенетическим происхождением рассматриваемых бокситов, включающих предлатеритную, латеритную, диагенетическую и эпигенетическую стадии их формирования.

В Китае бокситы рассматриваемой эпохи развиты достаточно широко. Здесь разведано более 350 мелких и средних по запасам месторождений с общими запасами 1 млрд тонн [51]. Основная их часть принадлежит к пластообразному осадочному типу в терригенных толщах и связана с угленосными формациями каменноугольного и пермского возраста Корейско-Китайской (Северо-Китайской) и Южно-Китайской платформ [52-54]. Месторождения располагаются в

периферических частях угленосных бассейнов и залегают на закарстованной поверхности карбонатных отложений в основании угленосных толщ.

Качество руд в основном низкое: бокситы главным образом диаспоровые, с невысоким кремневым модулем Al_2O_3/SiO_2 (в среднем 4–6), хотя и с высоким содержанием глинозема (55–65%) и низким – оксидов железа [55]. Помимо диаспора отмечаются бемит, гипсбит, каолинит, гематит, бертьерин.

На Северо-Американской платформе бокситы осадочно-диагенетического и карстового типов (рис. 11) залегают на неровной поверхности девонских доломитов Мидконтинента и приурочены к перерыву между нижним и верхним карбоном (миссисипием и пенсинвалием).

Они гипсбит-бемитовые, имеют меняющуюся мощность от первых до 15 м в зависимости от глубины карстовых воронок и последующего размыва.

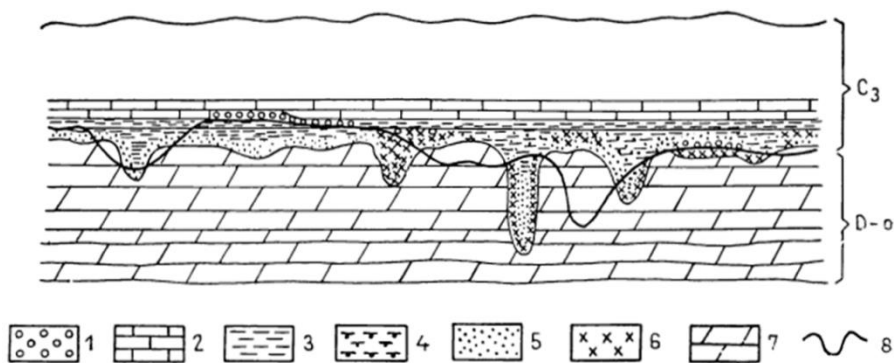


Рис. 11. Сводный геологический разрез бокситовых залежей Миссури, США: 1 – гальки; 2 – известняк, верхний карбон; 3 – аргиллит; 4 – боксит и бокситовая глина; 5 – песчаник; 6 – глинистый песчаник; 7 – доломит, ордовик и девон; 8 – современная поверхность денудации. [56].

[Fig. 11. A consolidated geological section of bauxite deposits in Missouri, USA: (1) – pebbles; (2) – limestone, Upper Carboniferous; (3) – mudstone; (4) – bauxite and bauxite clay; (5) – sandstones; (6) – argillaceous sandstones; (7) – dolomite, Ordovician and Devonian; (8) – modern denudation surface [56].]

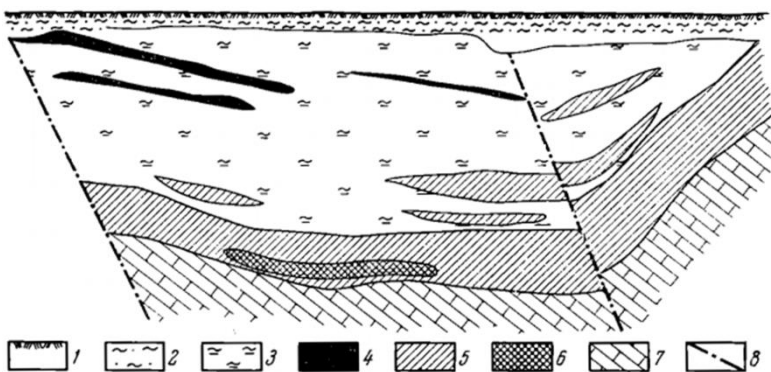


Рис. 12. Схематический геологический разрез юго-восточной части Волчанской депрессии: 1 – торф, 2 – глина песчаная, 3 – аргиллит и алевролит, 4 – уголь, 5 – бокситовидная пестроцветная глина, 6 – боксит и аллит, 7 – известняк, 8 – линии тектонических нарушений [24].

[Fig. 12. A schematic geological section of the south-eastern part of the Volchanskaya Depression: (1) – peat; (2) – sandy clay; (3) – mudstone and siltstone; (4) – coal; (5) – bauxite variegated clay; (6) – bauxite and allite; (7) – limestone; (8) – lines of tectonic disturbances [24].]

Позднетриасово-раннеюрская эпоха. В течение мезозоя бокситы формировались на протяжении всей эры при перерывах в осадконакоплении. Так в Динарской провинции Западной Европы насчитывается не менее 6 бокситоносных уровней на разных стратиграфических интервалах. Но основные месторождения глинозема приурочены к трем из них – поздне-триасово-раннеюрскому, апт-альбскому и верхнемеловому. Первый из них отвечает времени планации герцинид, второй и третий – киммерид, когда в ре-

зультате регрессии морских бассейнов на многих территориях установился континентальный режим.

На Урале линзы бокситов рассматриваемой эпохи, залегающие в основании угленосного лейаса в Сосьвинско-Салехардском, Люльинском, Богословском, Волковском (рис. 12) грабенах, в том числе Иштвинского месторождения, описаны А. П. Сиговым [57]. Латеритные гипсбитовые бокситы Актогайского, Кемпендьяйского и Кредиковского месторождений также имеют возраст поздний триас – нижняя юра [58, 59].

В Казахстане, в его южной части, на территории эпипалеозойской платформы имеются многочисленные месторождения бокситов рассматриваемой эпохи. Они образуют линзы в карстовых полостях каменноугольных известняков. Несколько мелких месторождений такого же генезиса имеются в Ферганской долине Узбекистана. Однако они образованы уже в пределах Средиземноморского подвижного пояса, на его части, подвергнувшейся раннекиммерийской складчатости и последующей пенепленизации. С ними связаны месторождения Джебан и Керман в Иране, Донг-Данг на северо-западе Вьетнама и Тала в Афганистане [9]. Бокситы последнего мощностью около трёх метров развиты в КВ эффузивов, тогда как другие – по карбонатным породам (тип «терра-росса»).

В Западной Европе, в альпийской складчатой области, промышленные триасовые месторождения бокситов разведаны в Словении (Боровница, 50 млн т) и Боснии (Лица, 130 млн т) [13]. Кроме того, известны многочисленные проявления бокситов на границе триаса и юры. С этим перерывом связаны месторождения Ничкишка-Жупа (Сербия, Черногория) с разведанными запасами 350 и прогнозными 165 млн тонн и Медерс (Турция) с запасами порядка 200 млн тонн.

Все они сформировались в пределах эпигерцинских карбонатных платформ, широко развитых в Средиземноморском поясе.

Раннемеловая эпоха. Характеризуется планетарным уровнем мощного корообразования, с которым связаны многочисленные месторождения бокситов различного генезиса. Это время высокого стояния и планации континентов Северного полушария и Австралии, в меньшей степени на других континентах Годваны и Северной Америки. Корообразование началось в неокоме, его максимум пришелся на апт-альбское время. На возвышенных участках рельефа в складчатых поясах оно продолжалось в течение всего позднего мела вплоть до кайнозоя.

На ВЕП, в пределах южной части Украины, имеются многочисленные проявления и несколько мелких месторождений латеритных бокситов, развитых в КВ на породах нижнего докембрия, содержащих повышенные количества глинозема. Это амфиболиты, габбро, хлоритовые и амфиболитовые сланцы. Залежи имеют плащевидную форму (рис. 13), каолинит-гиббситовый состав с примесью оксидов железа. Размеры залежей небольшие, их мощность 0.5–7, средняя – 1.4 м.

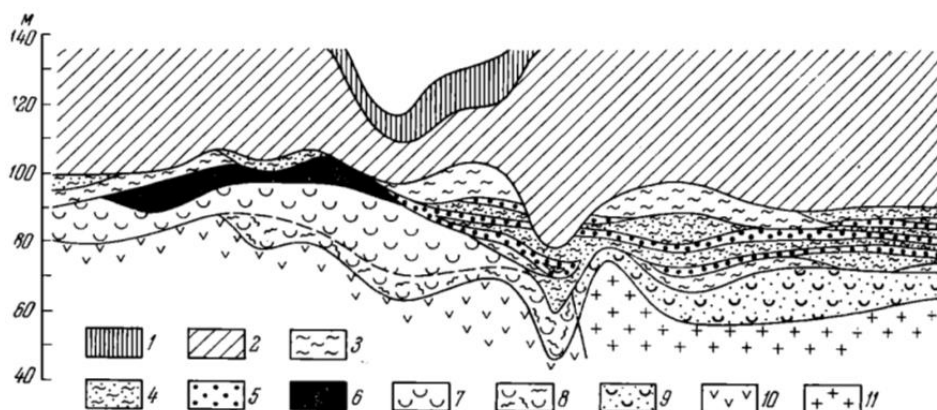


Рис. 13. Геологический разрез. Смелянское месторождение. Отложения 1 – четвертичной системы, 2 – неогеновой и палеогеновой систем; альба: 3 – глины каолинитовые, 4 – песчано-глинистая каолинитовая порода, 5 – бокситы осадочные, 6 – бокситы латеритные, 7 – каолины первичные, бескварцевые, 8 – каолины первичные, с кварцем, 9 – каолинит-иллит-монтмориллонитовые породы; кристаллический фундамент: 10 – лабродориты и габбро (вверху разрушенные), 11 – граниты рапакиви (вверху разрушенные) [24].

[Fig. 13. Geological section of the Smelyanskoye field. Sediments: (1) – Quaternary system; (2) – Neogene and Paleogene systems; alba: (3) – kaolinite clays; (4) – sandy-clay kaolinite rock; (5) – sedimentary bauxite; (6) – laterite bauxite; (7) – primary kaolins, quartz-free; (8) – primary kaolins, with quartz; (9) – kaolinite-illite-montmorillonite rocks; crystalline basement; (10) – labradorites and gabbro (destroyed at the top), (11) – rapakivi granites (destroyed at the top) [24].]

В меридиональной полосе Восточного склона Урала разведано свыше 60 мелких месторождений нижнемеловых бокситов. Они приурочены к отложениям синарской свиты апт-альбского возраста, залегают в депрессиях (рис. 14) на КВ вулканогенно-осадочных пород палеозоя и триаса, образуя карстовые, долинные и пластовые залежи мощностью 1.5–2 м, реже до 6 и больше [24]. Выделяются каменистые, рыхлые и глинистые разности бокситов. Их минеральный состав гиббситовый или каолинит-гиббситовый. В качестве примесей содержатся гематит, гетит, сидерит, хлорит, ильменит, лейкоксен и другие

аксессуары. Кремниевый модуль бокситов 4–6 и они относятся к низкокачественным разностям.

Формирование бокситов происходило за счет снеженного и переотложенного в депрессиях материала КВ в пролювиальных и озерно-болотных фациях, его бокситизации при проточном диагенезе. Исходный материал синарской свиты, представленный каолинитовыми глинами с обломками бокситов, изначально содержал повышенные количества глинозема. В условиях жаркого влажного климата в апт-альбское время проточный гидролиз определял формирование осадочно-диагенетического типа бокситов в рассматриваемом регионе.

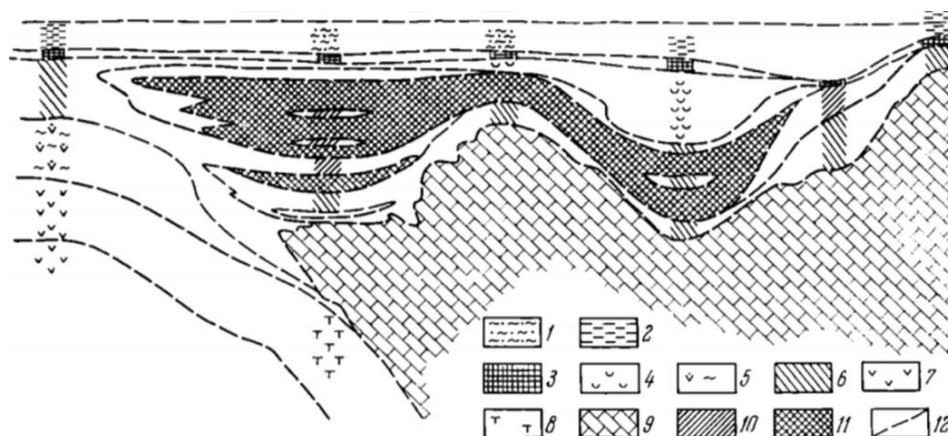


Рис. 14. Геологический разрез Мугайского месторождения [24]: 1 – глина песчаная, 2 – глина аргиллитовая, 3 – оолитовый бурый железняк, 4 – глина каолиновая, 5 – глинистая кора выветривания порфиритов, 6 – глина бокситовидная (аллиты, сиаллиты), 7 – порфириты, 8 – туфы порфиритов, 9 – известняки, 10 – боксит глинистый, 11 – боксит глинистый с обломками каменистого, 12 – геологические границы.

[Fig. 14. The geological section of the Mugaiskoe field [24]: (1) – sandy clay; (2) – mudstone clay; (3) – oolitic brown ironstone; (4) – kaolin clay; (5) – clay weathering crust of porphyrites; (6) – bauxite clay (allites, siallites); (7) – porphyrites; (8) – porphyrite tuffs; (9) – limestones; (10) – clay bauxite; (11) – clay bauxite with fragments of stony bauxite; (12) – geological boundaries.]

В южном окаймлении Западно-Сибирской плиты, в северной части Кузнецкого Алатау имеется группа нижнемеловых Барзасских месторождений бокситов карстового типа. Рудные тела линзовидной формы, их мощность до 6, обычно 1.5–2 м. Они образовались за счет бокситизации вещества размытой остаточной КВ в результате проточного гидролиза в карстовых полостях и депрессиях палеозойского фундамента.

На территории Казахстана, в пределах эпипалеозойской платформы, имеются месторождения бокситов осадочно-диагенетического и карстового типов альб-сеноманского возраста [60]. Они развиты в

Мугоджарском и Верхнетобольском районах на территории Тургайской впадины и образовались за счет размыва и переотложения глиноземной КВ неокм-аптского возраста.

В Средиземноморской бокситовой провинции протяженностью более 3000 км и площадью около 2 млн км², занимающей обширные территории Средней и Южной Европы, а также Азии до Памира включительно, сосредоточены многие сотни месторождений. Их основная доля приходится на европейскую часть провинции (рис. 15). Месторождения мелкие и средние, крупных (более 100 млн т) всего несколько.

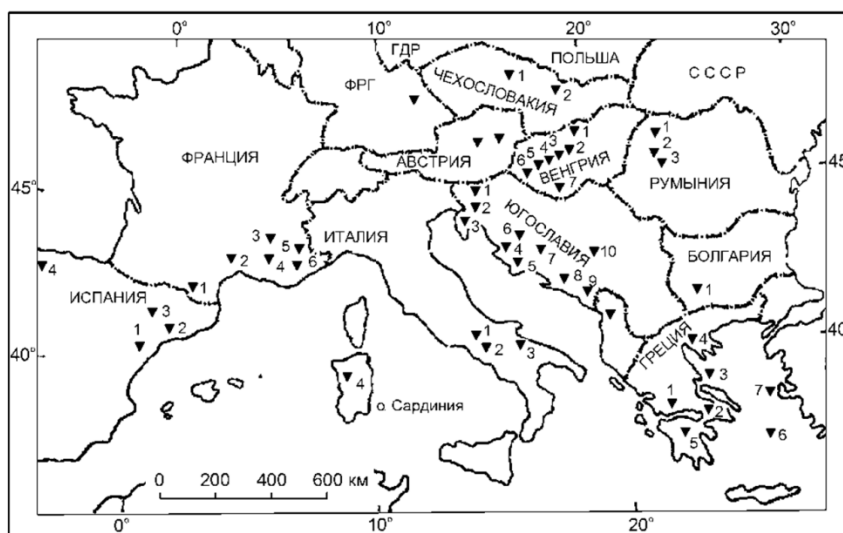


Рис. 15. Месторождения бокситов Западной Европы. По [9]. Испания: 1 – Маэстрагго; 2 – Барселона; 3 – Пиренейская Лерида; 4 – Леон. Франция: 1 – Арьеж; 2 – Бедарьё; 3 – Ле Бо; 4 – Арль; 5 – Драгиньян; 6 – Бриньоль. Италия: 1 – Абриuzzi; 2 – Кампания; 3 – Апулия; 4 – Нулла. Германия: Фогельсберг. Австрия: 1 – Унтерлаусса. Чехия: 1 – Рихнов; 2 – Мойтин. Польша: 1 – Нова Руда. Венгрия: 1 – Нежа; 2 – Обарок – Уйбарок; 3 – Гант; 4 – Искасентдгёрдь; 5 – Халимба; 6 – Нирад; 7 – Надьхаршань. Румыния: 1 – Падуре Крайюлю; 2 – Суходол Цемпени, горы Апусени; 3 – Хереть Бекен. Бывшая Югославия: 1 – Северная Словения; 2 – Южная Словения; 3 – Истрия; 4 – Обровац; 5 – Дрниш; 6 – Бихар; 7 – Яйце; 8 – Мостар; 9 – Никшич; 10 – Власеница. Греция: 1 – Парнас Киона; 2 – Мармара; 3 – Скопелос; 4 – Салоники; 5 – Астрос; 6 – Наксос; 7 – Самос.

[Fig. 15. Bauxite deposits in Western Europe. According to [9]. Spain: (1) – Maestrazgo; (2) – Barcelona; (3) – Pyrenean Lleida; (4) – Leon. France: (1) – Ariège; (2) – Bédarieu; (3) – Les Baux; (4) – Arles; (5) – Draguignan; (6) – Brignoles. Italy: (1) – Abruzzi; (2) – Campania; (3) – Apulia; (4) – Nurra. Germany: Vogelsberg. Austria: (1) – Unterlaussa. Czech Republic and Slovakia: (1) – Rychnov; (2) – Mojtín. Poland: (1) – Nowa Ruda. Hungary: (1) – Nezsza; (2) – Obarok – Újbarok; (3) – Gánt; (4) – Iszkaszentgyörgy; (5) – Halimba; (6) – Nyírad; (7) – Nagy-harsány. Romania: (1) – Pădurea Craiului; (2) – Sukhodol Tsempeni, Apuseni mountains; (3) – Heredy Beken. Former Yugoslavia: (1) – Northern Slovenia; (2) – Southern Slovenia; (3) – Istria; (4) – Obrovac; (5) – Drniš; (6) – Bihać; (7) – Jajce; (8) – Mostar; (9) – Nikšić; (10) – Vlasenica. Greece: (1) – Parnassus Giona; (2) – Marmara; (3) – Skopelos; (4) – Thessaloniki; (5) – Astros; (6) – Naxos; (7) – Samos.]

Они приурочены к карбонатным толщам эпигерцинской платформы стран Средней Европы (Испания, Франция, ФРГ, Чехия, Венгрия, Румыния). В Южной Европе (Италия, Сербия, Греция, Болгария) бокситы тяготеют к складчатым областям. С ними в Азиатской части провинции связаны месторождения Турции (около 40), Сирии, Арабских эмиратов, Ирана, Пакистана. Они вместе с вмещающими породами подверглись диастрофизму и в некоторых местах были преобразованы в корундиты.

Бокситы карстовые (рис. 16), образуют линзы, карманы, иногда пласты мощностью до 10 и более, чаще первые метры. Качество бокситов высокое, их химсостав: Al_2O_3 45–55, SiO_2 2–10, Fe_2O_3 15–23, TiO_2 2–3; ППП 12–20% [61]. Кремниевый модуль обычно выше 10. Среди бокситов преобладают бемит-гиббситовые, но встречаются гиббситовые и диаспор-бемитовые разновидности, присутствуют гематит, гетит и каолинит.

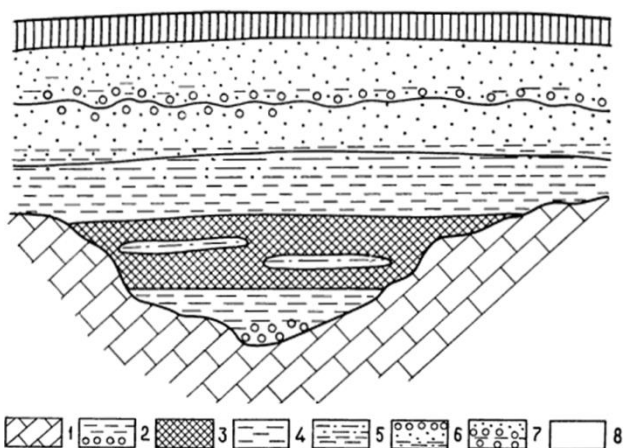


Рис. 16. Разрез залежи бокситового месторождения Хагег, Румыния: 1 – известняк, нижний мел; 2 – глины подошвы; 3 – боксит; 4 – глины с прослоями известняка; 5 – глинистый песчаник; 6 – песчаник и конгломерат; 7 – сеноманская трансгрессия; 8 – четвертичные отложения [14].

[Fig. 16. Section of the Hațeg bauxite deposit, Romania: (1) – limestone, Lower Cretaceous; (2) – bottom clays; (3) – bauxite; (4) – clays with limestone interbeds; (5) – argillaceous sandstones; (6) – sandstone and conglomerate; (7) – Cenomanian transgression; (8) – Quaternary deposits [14].]

Позднемеловая эпоха. В это время на некоторых территориях бокситонакопления, унаследованных от предыдущей эпохи и не перекрытых морями, продолжалось формирование концентраций глинозема. Так в Казахстане ряд месторождений Тургайской впадины (Краснооктябрьское, Козыревское, Озерное и некоторые другие) имеет турон-сантоский возраст [62]. Здесь бокситы развиты на мощной (до 100 м) КВ вулканогенно-осадочных палеозойских пород, в составе которых значительную роль играют карбонаты и туфы. Рудные тела приурочены к карстовым полостям и подстилаются обычно каолиновыми глинами. Наиболее крупным является Краснооктябрьское месторождение, запасы которого порядка 200, а резервы 100 млн тонн.

В Западной Европе к верхнемеловым относятся крупные месторождения Греции Геликон (260 млн тонн) и Киона, содержащее порядка 200 млн разведанных и 140 млн резервных запасов (рис. 17). Бокситы имеют красно-бурый цвет, мелко оолитовые, диаспор-бемитовые. Глинозема в них 60 %, кремнезема до 4%, оксидов железа 20–25, титана 2.5–3% [60]. Запасы мезозойских бокситов этой провинции 1.9, а общие – 3.3 млрд тонн.

Палеоген-четвертичная эпоха. Бокситонакопление происходило в пределах древних и молодых платформ, складчатых областей, островных дуг, а также щитовидных вулканов океанических акваторий [20]. Выветриванию подвергались различные по составу магматические, метаморфические и осадочные породы криптозоы и фанерозоя. На континентах бокситы формировались на верхнемеловой и эоценовой поверхностях выравнивания. Первая больше выражена в Северном полушарии, вторая – на гондванских платформах.

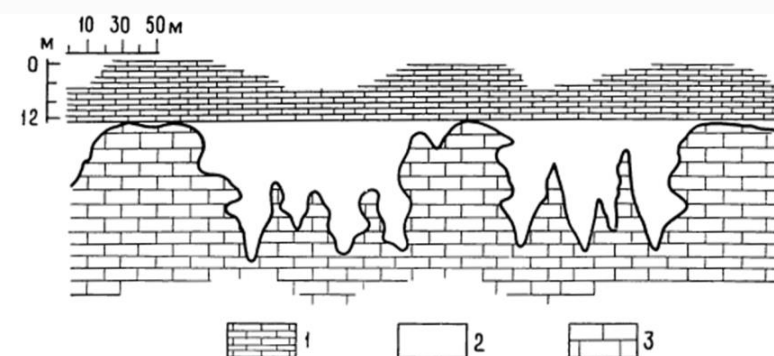


Рис. 17. Сложная воронкообразная залежь, горы Киона, Греция: 1 – известняк, турон и сенон; 2 – боксит; 3 – известняк подошвы, сеноман [14].

[Fig. 17. Complex funnel-shaped deposit, Giona mountains, Greece: (1) – limestone, Turonian and Senonian; (2) – bauxite; (3) – bottom limestone, Cenomanian [14].]

На северо-западе США плащеобразные залежи бокситов мощностью 2–6 м развиты на третичных базальтах. В штате Арканзас находятся 8 из 25 бокситоносных районов юго-востока США с остаточными пестро-цветными гиббситовыми пористыми бокситами в КВ, развитой по верхнемеловым нефелиновым сиенитам, образующим невысокие холмы. Вниз по их склонам губчатые элювиальные разновидности переходят в оолитовые и пизолитовые латеритно-осадочные, разности залегающие среди эо-

ценовых отложений [9]. Бокситы высококачественные, глинозема в них 50–60%, запасы – менее процента от мировых.

Низкокачественные бокситы (до 2 м) неогена на базальтах имеются в Северной Ирландии. Верхние горизонты бокситов некоторых месторождений Греции, Боснии, Австрии, Венгрии приурочены к верхнемеловой-раннепалеогеновой поверхности выравнивания (рис. 18). Эоценовый возраст имеют некоторые залежи в Турции [9].

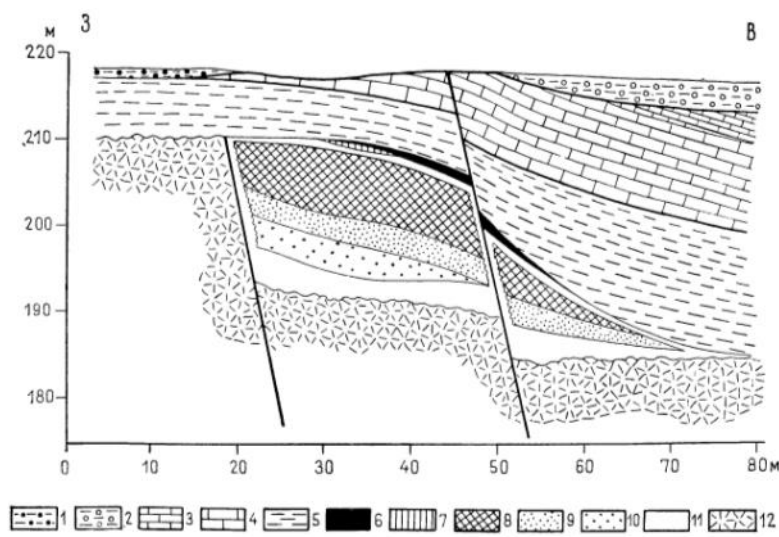


Рис. 18. Бокситовая залежь, ограниченная с одной стороны сбросом. Участок Изамайор, месторождение Ньярад, Венгрия: 1 – песок, глин, верхний плиоцен; 2 – гальки с глиной, верхний плиоцен; 3 – известняк, тортон; 4 – известняк, средний эоцен; 5 – милиолиновый известняк, средний эоцен; 6 – углистая глина, нижний эоцен; 7 – пестрая глина, нижний эоцен; 8 – высококачественный боксит; 9 – низкокачественный боксит; 10 – глинистый боксит; 11 – бокситовая глина; 12 – доломит, верхний триас [14].

[Fig. 18. A bauxite deposit bounded on one side by a fault. Izamajor site, Nyirad field, Hungary: (1) – sand, clay, Upper Pliocene; (2) – pebbles with clay, Upper Pliocene; (3) – limestone, Tortonian; (4) – limestone, Middle Eocene; (5) – miliolinic limestone, Middle Eocene; (6) – coal clay, Lower Eocene; (7) – variegated clay, Lower Eocene; (8) – high quality bauxite; (9) – low-quality bauxite; (10) – clay bauxite; (11) – bauxite clay; (12) – dolomite, Upper Triassic [14].]

Наиболее крупными месторождениями этого возраста являются Гант (60 млн т) в Венгрии и Обровац (50 млн т) в Боснии [20]. На территории Казахстана, в пределах эпипалеозойской платформы выделяется две обширных провинции – Центрально-Казахстанская и Тургайская, включающие восемь районов – Западно- и Центрально-Тургайские, Амангельдинский, Целиноградский, Экибастуз-Павлодарский, Северо-Кокшетауский, Мугоджарском и Южно-Казахстанский. Балансовые запасы учтены по 22 месторождениям, из которых пять эксплуатируются [64]. Наиболее крупными являются: Краснооктябрьское, Белинское, Восточно-Аятское и Таунсорское, а наиболее высоким качеством отличаются бокситы Амангельдинского района. Общие ресурсы составляют порядка 1 млрд тонн [20].

Бокситы приурочены к позднемеловой поверхности выравнивания, их возраст – поздний мел-ранний палеоген. По структурно-текстурным признакам выделяются каменистые, рыхлые, глиноподобные, сахарные и углистые, по минеральному составу – каолинит-гиббситовые, гиббситовые, гематит-каолинит-гиббситовые разности бокситов. Качество бокситов в отдельных пробах и в среднем по залежам и месторождениям характеризуется значительными колебаниями химического состава (в %): Al_2O_3 – 28.0–53.0; SiO_2 – 1.8–20.0; Fe_2O_3 – 3.0–25.0; TiO_2 – 0.5–5.6 [24].

Больше всего глинозема (до 60%) в маложелезистых бокситах.

На юго-западе Восточно-Сибирской платформы имеется три группы палеогеновых месторождений бокситов – Чадобецкая, Приангарская и Татарская. Наиболее крупное из них Центральное в первой группе, остальные мелкие. Общие ресурсы этого вида минерального сырья составляют первые сотни тысяч тонн.

Бокситы залегают среди глин, заполняющих карстовые воронки, карстово-эрозионные впадины, котловины, развитые на терригенно-карбонатных породах протерозоя. Форма рудных тел – пологие залежи, линзы с пережимами и раздувами. В одном разрезе может быть несколько горизонтов бокситов, образованных при размыве латеритной КВ на водоразделах, останцы которой сохранились в отдельных местах. По минеральному составу бокситы гиббситовые и каолинит-гиббситовые с содержанием глинозема 37–43%. Бокситизация осадочного материала происходила в результате проточного гидролиза.

Основные запасы бокситов сосредоточены на гондванских платформах. Только в одной Южной Америке ресурсы 17.5 млрд тонн [20], что гораздо больше, чем образовалось в течение всего фанерозоя на континентах Евразийских и Северо-Американской

платформ. Все известные месторождения Южно-Американского региона тяготеют к Гвианскому щиту и юго-востоку Бразилии. Бокситы латеритного, реже латеритно-осадочного типа, приурочены к эоценовой (400–600 м), реже поздне меловой (900–1200 м) поверхностям выравнивания, развиты на кристаллических породах докембрия, меньше на осадочных образованиях и долеритах фанерозоя.

Залежи обычно плащевидные, мощностью от 1 до 10 м. Бокситы псевдоморфные, пористые, реже оолитовые и пизолитовые, гиббситовые, гетит-гиббситовые. Содержание глинозема в них 40–60%, кремнезема – первые проценты, оксидов железа – до 35%.

Кремниевый модуль обычно выше 10. Основные производители бокситов помимо Бразилии являются Венесуэла, Суринам, Гайана, Французская Гвиана, Колумбия.

В странах *Карибского бассейна* запасы бокситов превышают 2.5 млрд тонн. Только на острове Ямайка находится более 100 месторождений, крупнейшим из которых является Манчестер с запасами 400 млн т. Оно расположено в мульде, сложенной карбонатными породами эоцена и нижнего миоцена, имеет протяженность 32 км и относится к карстовому типу. Морфология залежей – линзы (рис. 19), карманы и пласты, их средняя мощность 7.5, но может достигать 35 м [9].

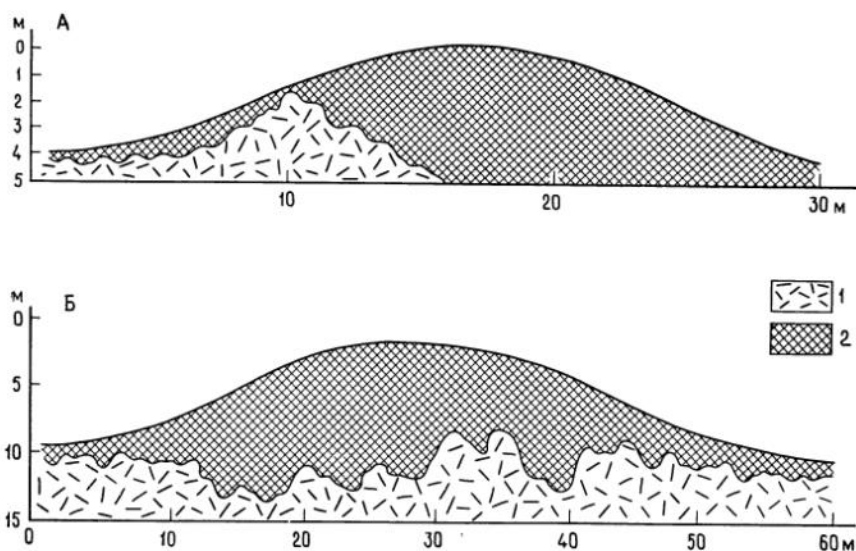


Рис. 19. Геологические разрезы линзообразных бокситовых залежей на плато Манчестер, остров Ямайка: А – обнажение в дорожной выемке; Б – холм, разведанный буровыми скважинами; 1 – известняк подошвы; 2 – боксит [14].

[Fig. 19.] Geological sections of lens-shaped bauxite deposits on the Manchester Plateau, Jamaica: (A) outcrop in a roadway excavation; (B) hill explored with boreholes; (1) bottom limestone; (2) bauxite [14].

Бокситы бемит-гиббситовые, высокого качества. Глинозема в них 46–52, в среднем 50%, кремнезема 0.7–1.6, оксида железа 19–23%. Месторождения подобного типа, но в меньших масштабах, имеются в Гаити, а также в Доминиканской республике. Там они расположены в провинции Бараока на высоте 1000–1500 м над уровнем моря. Содержат 46–49% Al_2O_3 , 19.4–20.6% Fe_2O_3 и 1.6–5.2% SiO_2 , а их запасы 85 млн т. [14].

В Африке сосредоточены громадные запасы бокситов, свыше 30 млрд тонн, особенно в её западной части. Там в бокситоносной провинции Фета-Джалон-Мандиго, на территории Гвинеи, Мали и Гвинеи Бисау, имеется более 1000 месторождений, из которых 72 крупных (100–200 млн т.), 30 очень крупных (200–350 млн т.) и 15 гигантских (более 350 млн т.) [8, 65]. По данным этих авторов в них практически сосредоточена половина всех запасов Мира. Кроме того, месторождения бокситов известны в других странах Африки – Анголе, Гане, Камеруне, ЮАР, Сьерра-Леоне, Мадагаскаре, Ботсване, но общие запасы в них на порядок ниже, чем в Западной Африке.

Бокситы Африки изучались многими российскими и зарубежными исследователями [7, 8, 56, 66–71 и другие]. По данным этих авторов бокситы формировались на выравненных поверхностях (пенепле-

нах) поздне мелового, эоценового, миоценового и плиоценового возрастов. Реликты первой на повышенных участках, тогда как эоценовая широко распространена ниже в пределах бовалей, рассеченных речными долинами и оврагами (рис. 20). Более молодые поверхности выравнивания представляют аккумулятивные равнины, сложенные континентальными отложениями, подвергшимися бокситизации в неогеновое время.

Латеритные бокситы развиты в КВ по кристаллическим породам докембрия различного состава, осадочным образованиям палеозоя и прорывающим их долеритам мезозоя. Обычная мощность рудных тел 5–15 м, они образуют плащевидные залежи, подстилаются каолинитовыми глинами литомаржа, переходящими вниз по разрезу в слабо выветрелые материнские породы. Текстуры бокситов массивные, полосчатые, сланцеватые, в верхних частях профиля выветривания могут быть оолитовыми и пизолитовыми.

В минеральном составе бокситов преобладают гиббсит и гематит, в небольших количествах содержат каолинит, бемит, акцессорные минералы. Содержание глинозема в различных месторождениях варьирует от 37 до 70%, оксида железа – до 38, кремнезема – первые проценты, кремневый модуль может достигать 15 и более.

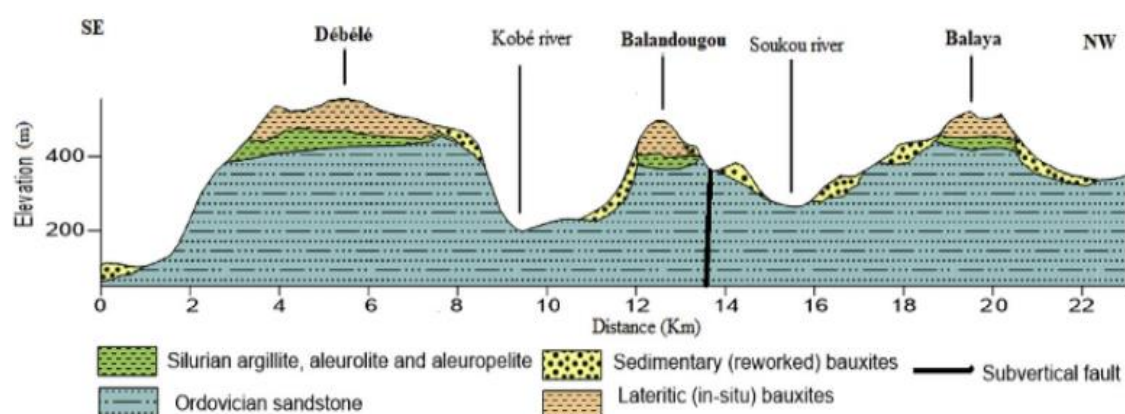


Рис. 20. Бокситовые месторождения Гвинеи, Западная Африка [71].
[Fig. 20. Bauxite deposits in Guinea, West Africa [71].]

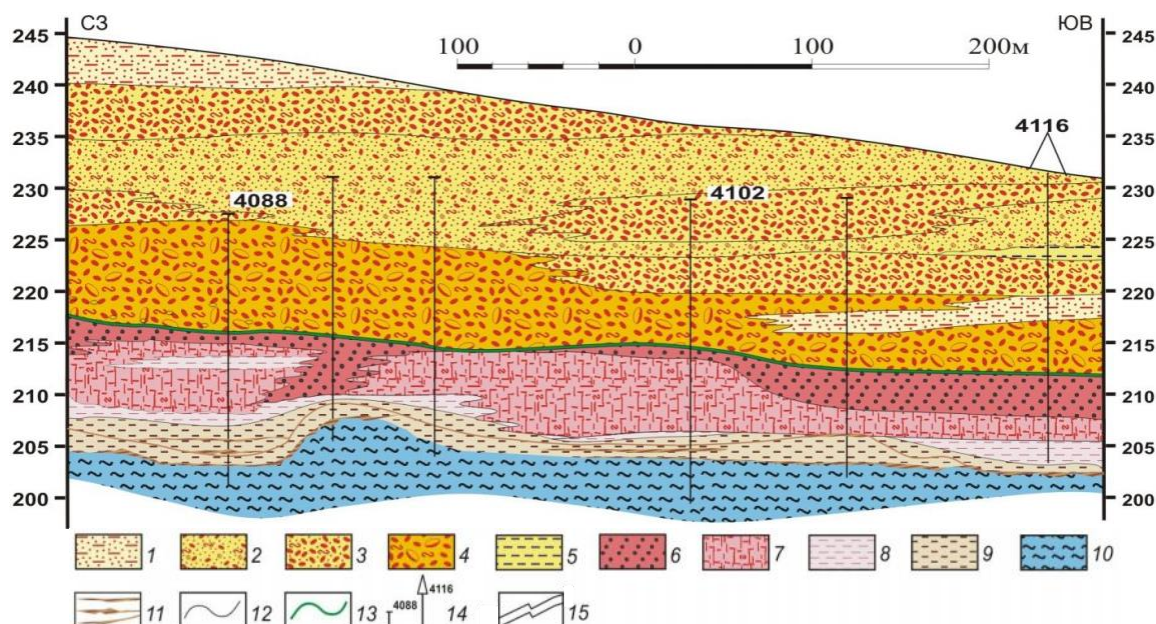


Рис. 21. Фрагмент геологического разреза месторождения Сангареди: 1-5 – отложения серии Сангареди преобразованные в бокситы: 1 – песчаниковидные, 2 – гравелит-песчаниковидные, 3 – гравеллитовые, 4 – гравеллит-конгломератные, 5 – глинистые бокситы; 6 – оолитовые бокситы; 7 – гелеморфные афанитовые и микроолитовые бокситы; 8 – глинистые бокситы по структурным глинам; 9 – железистые латериты переходной зоны, железистые глины; 10 – псевдоморфные каолинитовые глины; 11 – прослой ферриплантитов в железистых латеритах; 12 – линия современного рельефа; 13 – линия подошвы серии Сангареди; 14 – скважины колонковые; 15 – отсутствующий интервал в колонках скважин [72].

[Fig. 21. A fragment of the geological section of the Sangarédi deposit: (1-5) – sediments of the Sangarédi series converted into bauxites: (1) – sandstone, (2) – gravellite-sandstone, (3) – gravellite, (4) – gravellite-conglomerate, (5) – wocheinites; (6) – oolitic bauxite; (7) – gel-morphous adelogenic and microoolitic bauxites; (8) – quick clay wocheinites; (9) – iron rich laterites of the transitional area, iron limes; (10) – pseudomorphous kaolinite clays; (11) – ferriplantite interbeds in iron rich laterites; (12) – the line of the modern relief; (13) – the line of the bottom of the Sangarédi series; (14) – core drills; (15) – a missing interval in the drillhole logs [72].]

В провинции Фута Джалон-Мандинго помимо элювиальных широко распространены латеритно-осадочные бокситы. Так на уникальном месторождении Сангареди (запасы 49 млрд т.), изученном рядом авторов, по последним данным [72] показано, что его верхняя часть разреза представляет бокситы, развитые по континентальным осадочным отложениям одноименной серии (рис. 21). Этими авторами установлено полигенное и полихронное образование высокока-

чественных бокситов общей мощностью до 30 м. Содержание в них кремнезема и железа первые проценты, помимо гиббсита появляется бемит (до 40%). Благоприятные условия для образования бокситов в этой провинции определили их запасы в миллиарды тонн.

Вышеуказанные авторы установили, что образование месторождения Сангареди происходило в несколько стадий. В эоцене образовалась бокситоносная латеритная КВ на осадочных породах палеозоя и до-

леритах. При её размыве на озерно-аллювиальной равнине образовались отложения миоценовой серии Сангареди. В результате наложенного проточного диагенеза с выносом железа в нижних частях её разреза образовались бемитовые афанитовые мелкооолитовые бокситы. При подъёме территории в позднем миоцене осадочные породы верхних частей серии латеритным выветриванием были превращены в гиббситовые бокситы с сохранностью структурно-текстурных признаков материнского субстрата. Все эти процессы привели к образованию уникального месторождения с запасами 2 млрд т.

В Индии бокситы (запасы около 4 млрд т.) развиты в КВ на докембрийских интрузивных и метаморфических породах, а также долеритах верхнемеловых траппов, а перекрываются морскими отложениями эоцена или четвертичными образованиями. Бокситоносные районы Индии показаны на рис. 22. В разрезе КВ выделяются зоны литомаржа (сапролита), боксита и латерита. Расположение месторождений на предпалеогеновой поверхности выравнивания определены развитием древней речной сети и приурочены к склонам её долин [56, 73].

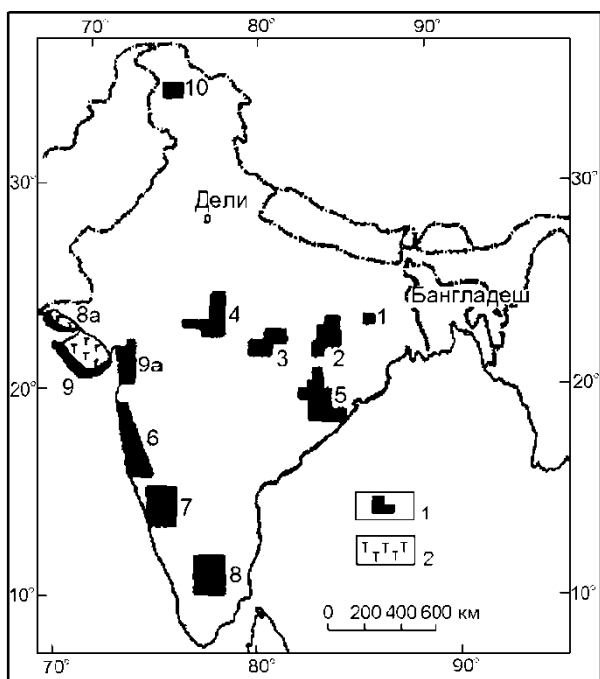


Рис. 22. Бокситоносные районы Индии. Районы: 1 – Ранчи и Паламау, штат Бхар; 2 – Сурджуа – Райгарх-Биласпур, штат Мадхья-Прадеш; 3 – гряда Майкала, штат Мадхья-Прадеш; 4 – Шивпури, Гуна, Бхилса, Шайяну, Бхопал в штате Мадхья-Прадеш; 5 – штат Орисса; 6 – штат Махараштра; 7 – штат Майсур; 8 – Мадрас, штат Тамилнад; 9, 9а, 9б – штат Гуджарат; 10 – штат Джамму и Кашмир.

[Fig. 22. Bauxite-bearing areas in India [9]. Areas: (1) – Ranchi and Palamu, Bihar state; (2) – Surguja – Raigarh-Bilaspur, Madhya Pradesh state; (3) – Maikal Hills, Madhya Pradesh state; (4) – Shivpuri, Guna, Bhilsa, Shayanur, Bhopal in the state of Madhya Pradesh; (5) – Odisha state; (6) – Maharashtra state; (7) – Mysore state; (8) – Madras, Tamil Nadu; (9, 9a, 9b) – Gujarat state; (10) – Jammu and Kashmir state.]

На водоразделах развиты железистые латериты, в нижних частях склонов – каолиновые глины. Помимо преобладающих пестро-цветных могут формироваться отбеленные разности бокситов в результате выноса железа при просачивании вод из верховых болот в процессах диагенеза и эпигенеза. Мощность бокситов 5–6 м, редко больше.

По минеральному составу бокситы гиббситовые с примесью бемита, гематита, каолинита. Только в провинции Джамму он бемит-диаспоровый, обусловленный наложенными процессами дейтерогенеза в неогене на ранее сформированную КВ. Содержание глинозема в бокситах 40–60, редко доходит до 80% (штат Джамму и Кашмир [14]).

На территории *Индокитая* общие запасы бокситов составляют порядка шести млрд тонн [20], большая часть которых сосредоточена в Южном Вьетнаме. По данным геологической службы США за 2021 г. Вьетнам по запасам этого вида минерального сырья занимает третье место в Мире после Гвинеи и Австралии.

Бокситы развиты в КВ по неоген-четвертичным базальтам и являются самыми молодыми наряду с подобными образованиями Сирии, Новой Каледонии, Дакара [74–75]. В отдельных случаях отмечаются латериты на КВ гранитов. На северо-востоке страны известны мелкие диаспор-бемитовые месторождения с общими запасами 100 млн тонн на карбонатных породах верхнепермского возраста.

Рудные тела в КВ базальтов локализованы на вершинах холмов, у подножий которых замещаются каолиновыми глинами. Мощность элювия 15–20 м, в том числе аллитов, подстилаемых глинами литомаржа, 2–10 м. По всему разрезу КВ отмечаются «ядра» неизмененных базальтов, количество и размеры которых увеличиваются сверху вниз по разрезу [75]. Они отделены от выветрелых пород каолинит-гиббситовыми оторочками. Бокситы железистые, гиббситовые, содержат примеси каолинита и гетит. Содержание глинозема в них 35–49, кремнезема 1–8, оксида железа до 40%. Кремниевый модуль обычно не менее 7, что позволяет перерабатывать эти бокситы по способу Байера.

На островах *Индонезийского и Филиппинского архипелагов* общие запасы бокситов составляют более 2.5 млрд тонн [20]. Основные месторождения сосредоточены на островах Бинтан и Коджан южнее Сингапура [76]. Бокситы развиты в КВ (свыше 50 м) на сланцах и прорывающих их гранитах. Мощность бокситов, залегающих на глинах литомаржа, от 2 до 10, в среднем 4 м. Руды представляют собой гетит-гиббситовые конкреции (60–80%), погруженные в глинистую массу. Выделяются высококачественные ($Al_2O_3 > 55$, $SiO_2 < 4.5\%$) и низкокачественные ($Al_2O_3 > 45$, SiO_2 7–9%) разности бокситов, оксида железа в первой 4.35–4.45, во второй 9.12–13.25%. Сходные по составу и строению месторождения бокситовых руд также имеются на островах Банка, Синкеп, Сулавеси и Калимантан [76]. В меньшей степени рудные залежи отмечаются на вулканитах позднего

кайнозой, причем образуются сразу по долеритам без зоны литомаржа.

На Филиппинах бокситы мощностью 2–5 м развиты на закарстованных карбонатных и терригенных породах, имеют линзовидную и пластовую формы залежей, гиббситовый и бемитовый состав с примесью гематита, гетита и каолинита. Общие резервы порядка 400 млн тонн, наиболее крупные месторождения Нонок и Самар.

В Австралии месторождения с общими запасами 7 млрд тонн расположены в краевых частях континента (рис. 23). Наиболее крупными являются районы и месторождения Уэйпа (2.5 млрд т.) на севере страны.

Здесь на поверхности приморской равнины продуктивная толща в виде линз залегает на верхнемеловых-палеогеновых песчаниках с глауконит-каолинистым цементом. Она состоит из двух зон – нижней белой рыхлой каолинитовой (5–7 м) и верхней красной прочной бокситовой (3–4, иногда до 10 м). Верхняя сложена оолитами и пизолитами, сцементированными гиббситом, бемитом, гетитом, гематитом и каолинитом, содержит изъеденные зерна кварца. Качество бокситов высокое, глинозема в них 47–52, кремнезема 2–8, оксида железа 10–20% [77].

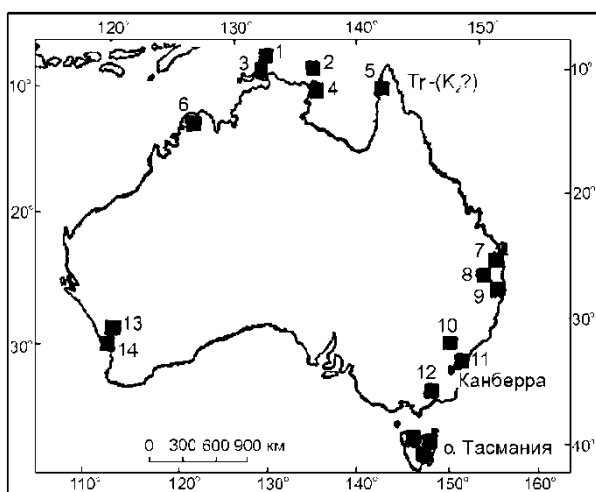


Рис. 23. Бокситовые месторождения Австралии [9]: 1 – о. Крокер, 2 – о-ва Марчинбар, 3 – п-ов Кобург, 4 – Гов, 5 – Уэйпа, 6 – Митчел Плато, 7 – Хемптон, 8 – Тамбурин-Маунтин, 9 – Инверелл, 10 – Трайдел, 11 – Мосс Вейл, 12 – Джипсленд, 13 – Дарлинг Рэйндж, 14 – Яррадел, 15 – о. Тасмания.

[Fig. 23. Bauxite deposits in Australia [9]: (1) – Croker Island, (2) – Marchinbar Island, (3) – Coburg Peninsula, (4) – Gove Peninsula, (5) – Weipa, (6) Mitchel Plateau, (7) Hampton, (8) Tambourine Mountain, (9) Inverell, (10) Tridel, (11) Moss Vale, (12) Jeepsland, (13) Darling Range, (14) Yarradel, (15) Tasmania.]

Бокситы других месторождений образуют плащеобразные залежи на останцах расчлененных пенепленов. Приурочены к верхним частям латеритной КВ, развитой на докембрийских породах (граниты, гнейсы, сланцы, долериты) и на кайнозойских базальтах. Залежи второго по запасам (свыше 1 млрд т.) бокситоносного района Митчелл-Плато Австралии сверху вниз представлены тремя зонами: железистой

(трубчатые и пизолитовые бокситы с гиббситовыми ядрами), пизолитовой и гиббситовой [78]. Средняя мощность залежей 3.2, максимальная 10 м. Их минеральный состав и содержания основных компонентов идентичны таким же бокситов района Уэйпа.

На юго-востоке страны небольшие месторождения латеритных бокситов развиты по неогеновым базальтам. Четвертичные аллиты в КВ по базальтам известны на островах Океании (Таити, Гаваи, Полинезии). В Полинезии и на островах Луайлоте известны высококачественные бокситы такого же возраста, образованные по карбонатам атоллов. Исходным материалом для глинозема была алюмосиликатная вулканическая примесь в известняках. Характерной особенностью четвертичных бокситов является непосредственное образование гиббсита по минералам материнской породы, в первую очередь по полевым шпатам, и растворение кварца в щелочной среде [79].

Обсуждение результатов

Анализ распределения месторождений бокситов в Мире показал, что первые эпизодические концентрации глинозема появились в раннем кембрии. Они возникли на закарстованной поверхности карбонатных пород венда, слагающих пенепленизированные байкалиды. Бокситы низкокачественные, не образующие промышленных месторождений. Наиболее известно Боксонское рудопроявление в Бурятии.

Первые промышленные месторождения бокситов эйфельского яруса среднего девона находятся на Северном Урале (СУБР). Там известны шесть высококачественных месторождений карстового типа. Наиболее крупным из них является Черемуховское с общими запасами бокситов 200 млн тонн. Мелкие месторождения этого возраста имеются на Полярном и Среднем Урале.

Провинция с промышленными месторождениями девонского возраста с общими запасами 500 млн тонн находится на Среднем Тимане. Разведаны Ворыквинская и Заостровская группы месторождений. Они раннефранского возраста, латеритного и осадочно-латеритного типов, образовались в пределах эпикаледонской платформы.

В отличие от предыдущих эпох бокситы раннекаменноугольно-пермского возраста развиты на обширной площади Северного полушария. Раннекаменноугольные месторождения расположены в краевых частях ВЕП (Белгородские, Тихвинские, Северо-Онежские, Южно-Тиманские), среднекаменноугольные – в пределах Китайской платформы. Пермские бокситы с небольшими запасами известны в Южной Корее, на севере Вьетнама и в пределах Средиземноморского подвижного пояса. Основные запасы рассматриваемой эпохи сосредоточены на территориях ВЕП (1.3 млрд т.) и Китая (1 млрд т.).

Месторождения мезозойских бокситов распространены в субширотной полосе, включающей Западную Европу, южную часть восточной Европы, Юж-

ный Урал, Казахстан, Южную Сибирь, Среднюю Азию. Основные запасы глинозема сосредоточены на трех уровнях: триас-юрском, апт-альбском и верхнемеловым. Преобладают бокситы карстового типа в подвижных поясах, и осадочно-диагенетического на молодых платформах. На первом уровне сосредоточены запасы свыше 700 млн на втором и третьем – 2.6 млрд тонн.

В кайнозойское время бокситонакопление распространено на громадной территории во многих регионах. Её северная граница проходит в штатах Орегон и Вашингтон на северо-западе, Арканзас и других на юго-востоке США, через Ирландию, Грецию, Черноморское побережье Турции, северную часть Казахстана и юг Сибири. Южная граница трассируется по линии юго-восток Бразилии, юг Африки и остров Тасмания (см. рис.1). Большинство месторождений, относящихся к латеритному и латеритно-осадочному типам, сосредоточено на территории гондванских платформ, а запасы составляют до 80 % от общемировых.

При сочетании благоприятных факторов бокситы могут формироваться в пределах различных тектонических структур. Это древние и молодые платформы, складчатые пояса, активные и пассивные океанические окраины, гайоты, увенчанные коралловыми атоллами. Благоприятными являются пенеппенизация рельефа после складчатости (коллизии) или дейтерогенеза и промываемость, т.е. пропущенные объёмы поверхностных и подземных вод через профиль выветривания. Это позволяет не только интенсифицировать разложение пород, но и выносить растворенные компоненты при хорошем дренаже даже в условиях относительно расчлененного рельефа.

В бокситоносной ФКВ выделяются латеритные (остаточные), латеритно-осадочные-, осадочно-диагенетические и карстовые разновидности руд. Первая и вторая образуются преимущественно при промывном (атмосферные осадки) гидролизе, третья – при сочетании промывного и проточного, четвертая – при проточном (подземные воды) гидролизе. Вторая разновидность формируется при размыве и ближнем переотложении вещества КВ, обогащенного глиноземом, в различных фациях делювия, коллювия, пролювия и аллювия и последующей их бокситизации. Осадочно-латеритных циклов бывает несколько, и при этом формируются крупные месторождения типа Иксинского и Плисецкого на севере ВЕП или суперкрупные как Сангареди в Западной Африке.

Осадочно-диагенетические бокситы, тяготеющие к озерно-болотным и долинным отложениям, также образуются при размыве и переотложении вещества КВ в краевых частях отрицательных структур. Ассоциируют обычно с угленосными отложениями, вверх по разрезку и простираению переходят в морские отложения, содержат нехарактерные для других разновидностей такие минералы как бертьерин, шамозит, сидерит. Для таких бокситов нередко отмечается обеление, вызванное переходом железа из трехвалентной формы в двухвалентную и его выносом из них. При

этом качество глиноземного сырья улучшается.

Карстовые бокситы образуются в тех случаях, когда в разрезах алюмосиликаты в терригенных и эффузивных породах ассоциируют с карбонатами. В силу легкой растворимости последних, процессы разложения резко усиливаются. Создается высокощелочная обстановка с рН более 8, в которой выносятся кремнезем, а алюминий может мигрировать и осаждаться на геохимических барьерах при понижении этого показателя. Такие условия характерны для бокситов при планации орогенов в подвижных поясах, а также на отдельных их участках при перерывах в осадконакоплениях, несмотря на высокие темпы эрозии. Карстовые бокситы при выветривании на указанных выше материнских породах нередки и на платформах.

Остаточные бокситы формируются на алюмосиликатных магматических, метаморфических и осадочных породах различного состава с содержанием глинозема не менее 10%. Наиболее благоприятным материнским субстратом являются нефелиновые сиениты (бокситы Арканзаса, США), базальты (покровы на гондванских материках), а также сланцы, гнейсы, глинистые породы, гранитоиды. Особое место занимают бокситы по породам каолинового профиля, в которых содержание глинозема более 20%.

Как показано в работе [80] формирование бокситов ФКВ происходит на водораздельных и склоновых участках пенеппенизированного рельефа в условиях хорошего дренажа. На озерно-аллювиальных равнинах с близким к поверхности уровнем грунтовых вод образуются каолиновые КВ. Это обусловлено пониженной промываемостью атмосферных вод в выветриваемых породах, при которой не происходит разделения ионов кремния и алюминия, образующих вместе с гидроксидом прочное каолиновое ядро.

Основными минералами бокситов являются гиббсит, бемит и корунд, второстепенными – оксиды железа, каолинит, бертьерин, шамозит, хлорит. При повышенных количествах некоторые второстепенные минералы становятся породообразующими, давая каолинит-гиббситовые, бертьерин-бемитовые, шамозит-бемитовые и другие разновидности.

Формирование бокситов крупных месторождений шло в несколько этапов, что в последнее время показано на примерах для месторождений КМА [46] и крупнейшей в Мире бокситоносной провинции Фута-Джалон Мандинго Западной Африки [8]. На КМА в *докаменноугольный этап* на сланцах образовалась иллит-каолининовая КВ. Она сохранилась в восточной части района, а также в нижних частях наложенного на неё латеритного профиля [43] *позднеюрско-ранневизейского этапа*. Латеритные бокситы формировались на иллитизированных и каолинитизированных сланцах предыдущего этапа выветривания, в которых содержание Al_2O_3 достигало 15%. За счет иллита и каолинита формировались минералы глинозема и бертьерин. Обширное развитие последнего в бокситах КМА объясняется инфильтрацией железа при выветривании переслаивающихся со сланцами

джеспилитов.

Принятая ранее модель формирования бокситового профиля [43, 81] согласно которой сначала формируются гиббситовые бокситы, а все остальные типы являются их производными при проточном гидролизе, нуждается в корректировке. Фактические данные свидетельствуют о непосредственном развитии бемита по иллиту, бертьерину, остаточному каолиниту с сохранением реликтовой слоистости. И уже в аллитовой зоне, где основным минералом является бемит, началось формирование псевдобобовых текстур, характерных для гиббситовых бокситов.

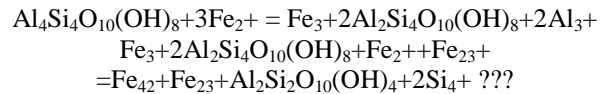
Условия формирования и порядок кристаллизации разных гидроксидов алюминия в бокситах рассматриваются в работах исследователей [72, 82–85]. Образование парагенезиса гиббсит-гетит происходило при высоком положительном значении окислительно-восстановительного потенциала и низком pH [14]. По этому автору кристаллизация гиббсита начинается в среде богатой щелочами, он ограничен пизолитовым горизонтом и образуется за счет каолинита с последующим выщелачиванием кремнезема, единичные реликты каолинита сохраняются в образцах гиббситовых бокситов и были нами обнаружены.

Таким образом, образование гиббситовых бокситов происходило в окислительной обстановке, при этом часть гиббсита могла образоваться за счет каолинита [86] после удаления кремнезема. Каолинит растворяется неконгруэнтно, давая гиббсит (в качестве остаточного материала) и аморфный диоксид кремния в растворе.

Дж. Б. Мэйнард предположил, что граница между зонами бемита и гиббсита является маркером положения уровня грунтовых вод [87]. В работе [72], установлено, что в профиле латеритного выветривания над зеркалом грунтовых вод за счет низкого содержания кислорода и высокого углекислого газа формируется горизонт высококачественных бемитовых бокситов, гиббситовые разновидности формируются в зоне аэрации. Из этого следует, что образование гиббситовых бокситов происходило в возвышенных участках, приуроченных к склонам мелких поднятий, прилегающих к контакту с БЖР, бемитовые занимали более низкий гипсометрический уровень и образовывались в окислительно-восстановительных условиях. Это объясняет распространение в северной части КМА преимущественно гиббситовых бокситов, а в южной – бемитовых.

При достаточном количестве железа, каолинит переходит в бертьерин. В литературе известны экспериментальные данные, свидетельствующие о постепенном переходе каолинита в бертьерин в процессе выветривания и раннего диагенеза [88]. Различные пути образования бертьерина все еще являются предметом обсуждения. Общепринятая концепция, что бертьерин образуется в восстановительной среде путем замены или модификации предшественника [89]. Автор [87] предположил, что процесс замены предшественника основан на полном растворении с последующим по-

вторным осаждением, а не простым добавлением двухвалентных катионов к каолиниту и его структурному преобразованию, формула перехода одного минерала в другой следующая:



Как бокситоносная, так и железорудная КВ богаты железом, необходимым для трансформации минералов. Наиболее выгодная химическая среда для трансформации каолинита в бертьерин имеет pH 7 и Eh между -200 и -300 мВ [86, 90]. Бертьерин может образоваться в замкнутой системе, где растворение каолинита и других минералов обеспечили бы условия необходимые для его формирования. Степень бертьеринизации зависела от форм палеорельефа или типа берега в краевой части трансгрессирующего тульского моря [91].

Важным фактором выветривания в образовании бокситов КМА, как и богатых железных руд, является биологический фактор, проявившийся еще на каолинитовой стадии корообразования (свидетельством тому являются находки биоморфных структур в КВ Стойленского месторождения Старооскольского района), и продолжавшийся при латеритном процессе. Выщелачивание кремнезема силикатными бактериями (исследования Л. К. Яхонтовой и др., выполненные в 1983–1985 гг.) приводит к разрушению ряда силикатов, алюмосиликатов и кварца. В многокомпонентных системах все компоненты (минералы, вода, среда, бактерии) взаимодействовали между собой. В результате происходили изменения химического состава минералов и растворов, параметров роста бактерий, минеральных и кристалломорфологических характеристик. Бактерии выводили из среды ряд элементов, используя их в процессе роста, а также способствуя переходу в обменный пул минералов [92].

При великом разнообразии размеров, морфологии и физиологии живых организмов, общим для них всех условием существования является обмен веществ со средой обитания. Жидкие метаболиты и продукты отмирания влияют на кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия природных вод, которые закономерно преобразуют верхнюю часть литосферы, извлекают из нее определенные химические элементы [93, 94].

Микроорганизмы продельывают большую работу по преобразованию минералов алюминия. Наиболее вероятным способом извлечения и транспортировки алюминия являются растворенные органоминеральные (алюмовульфатные) и коллоидные соединения, образованные в условиях гумидного климата при наличии растительного покрова и взаимодействии органических кислот с алюмосиликатными породами [95]. Необходимым условием является дренаж поверхностными и подземными водами со скоростью более 10^{-5} см/с [95]. Такая обстановка способствует энергичному удалению алюминия в форме хелатов,

что определило его отделение от кремния. Дальнейшее взаимодействие растворов с породами приводило к разрушению хелатов и осаждению алюминия в виде гиббсита или бемита. Существование органических соединений, сохранившихся после разрушения хелатов, также оказывало влияние на процесс минералообразования [83].

Следующим этапом продолжения формирования бокситов перед подтоплением и перекрытием их осадками трансгрессирующего моря является *диагенетический*. Изменение параметров физико-химической среды в латеритном профиле вызывает метасоматические преобразования, которые накладываются на КВ КМА на завершающих этапах развития. Не уничтожая зональности латеритов, диагенетическая преобразования значительно усложняют их строение. Они зависят от степени привноса – выноса алюминия, железа и привноса кремниевой кислоты в конкретной фациальной обстановке [43].

На этом этапе в условиях гидроморфного режима произошло метасоматическое преобразование пород КВ, выраженное сначала в наложенной бертьеринизации, а затем шамозитизации, сидеритизации и сульфидизации бокситов в зоне цементации перед перекрытием её осадками, а также в процессах обеления и преобразования минеральных форм гидроксидов алюминия в бокситах [96]. В верхних частях залежей происходят процессы дебокситизации – разубоживания бокситов в результате их каолинизации, хлоритизации и др. В результате происходит уменьшение значения кремневого модуля. Замещение минералов боксита каолинитом является результатом взаимодействия руды с фильтрующим раствором кремниевой кислоты, в результате чего растворяются исходные минералы свободного глинозема и отлагается из раствора каолинит.

Исследования отложений тульского времени позволяют считать его рубежом между латеритным образованием и диагенетическим преобразованием продуктов выветривания КМА [91]. Характер и интенсивность преобразований обусловлены медленным наступлением морского бассейна, о чем свидетельствует широкое развитие лагунных и озерно-болотных фаций, чередующихся с кратковременными перерывами в осадконакоплении. Образование вторичных минералов определялось различными геохимическими условиями той или иной площади, в зависимости от палеоландшафтной обстановки. Образование сидерита и бертьерина приурочено к участкам развития озер и болот.

Бертьеринизация основной массы бокситов и БЖР происходила в гумидных условиях тульско-алексинско-михайловского времени визейского века [96]. Предполагается, что диагенетический бертьерин как в БЖР, так и бокситах формировался в восстановительных условиях, которые были установлены в результате нисходящей фильтрации богатых органическими веществами водами болот [86]. Восстановительная среда для образования бертьерина могла быть обу-

словлена интенсивной микробной активностью [89]. Предполагается, что только небольшое количество бертьерина может образоваться во время раннего диагенеза при отсутствии органических веществ [97]. Необходимое количество железа для образования бертьерина поступало в бокситы из примыкающих БЖР, кроме того, морская трансгрессия может обеспечить условия для превращения оксидов железа в бертьерин в процессе диагенеза [86]. Автор [87] считает, что при дальнейшем захоронении часть бертьерина переходит в шамозит, вероятно, с этим связано расположение зоны шамозитизации выше зоны бертьеринизации в профиле КВ.

Образование сидерита, который служит цементирующим компонентом руд, может быть, в том числе, связано с жизнедеятельностью бактерий, в группу которых входят и сульфатредуцирующие. Последние присутствуют в карбонатной толще известняков, перекрывающих рудное тело.

Эпигенетический этап охватывает поствизейское время, когда вся территория была погружена в связи с формированием юго-западного склона палеозойской Воронежской антеклизы. При этом породы подверглись изменениям в условиях раннего катагенеза [45]. По трещинам и сколам происходила сульфидизация и кальцитизация. В засушливых условиях пермского времени образовался кальцит, заполняющий трещины в породах. Руды в зависимости от слагающих их минералов приобрели различную плотность в результате неравномерной цементации в верхних частях профилей.

В тропических странах с приповерхностным залеганием бокситоносных образований эпигенетические процессы могут быть выражены в наложении латеритного выветривания на уже сформированные породы. Это приводит к образованию крупных месторождений типа Сангареди.

Анализ особенностей бокситообразования в фанерозое показывает его изменение и наращивание со временем. Для каждой эпохи, отвечающей континентальному перерыву и формированию месторождений глинозема, характерны свои специфические черты. Они выражаются в приуроченности бокситов к определенным тектоническим структурам, эволюционирующим со времени, изменениях минерального состава и типов полезного ископаемого, роли материнских пород КВ и влияния органического фактора на выветривание.

Особенностями бокситообразования раннего кембрия является его эпизодичность и сочетание в бокситах минералов зон гидратации (иллит, смектит) и конечного гидролиза (диаспор, бемит, гематит). Это можно объяснить спецификой ландшафтов вендского времени. Оно происходило при планации байкалит в подвижных поясах на карбонатных породах, включающих терригенную и эффузивную составляющие. Из них алюминий в числе других элементов переводился в раствор и при снижении pH мог выпадать в разных частях элювиального профи-

ля. Влияние биоса на выветривание в ландшафтах, лишенных растительных покровов, могло проявляться только в виде бактериального воздействия на материнский субстрат на некоторой глубине от поверхности, где породы были защищены от губительного ультрафиолетового излучения [98].

Отличительными чертами эйфельско-франкской эпохи являются распространение месторождений бокситов за пределы подвижных поясов и образование скоплений глинозема при выветривании не только карбонатных толщ, но и иллит-каолинитовых глин и туфогенных пород. На процессах выветривания сказывается участие растительности в связи с её выходом на сушу при продолжающемся бактериальном воздействии на материнский субстрат. Об этом свидетельствуют многочисленные кокко- и палочковидные биоморфные структуры в бокситах, установленные методами электронной микроскопии [26]. Среди минералов глинозема преобладает бемит. Для эпохи в целом характерны относительно небольшие масштабы бокситонакопления. Известны первые десятки месторождений, единицы из них крупные с запасами более 100 млн тонн.

Особенностями бокситов раннекаменноугольной эпохи являются расположение их месторождений преимущественно на территориях древних и платформ, а в их пределах – в периферийных частях угленосных бассейнов, а также омоложение возраста бокситоносной ФКВ от визейского до раннепермского в поле её развития в направлении с северо-запада на юго-восток. Отмечается ярко выраженное полигенетическое формирование бокситоносной ФКВ обычно по выветрелым материнским породам в латеритную, диагенетическую и эпигенетическую стадии; в последнюю случаях перекрытия бокситов угленосными отложениями. Установлено активное участие органики в выветривании с образованием бактериальных биоморфоз.

Для этой эпохи характерен специфический минеральный состав бокситов, среди которых преобладают бемитовые и гиббсит-бемитовые, но имеются также бертьериновые и шамозитовые разновидности, определенные широким развитием диагенетических и эпигенетических процессов. Бокситы отличаются пониженными значениями кремниевого модуля и невысокими качествами из-за значительной примеси силикатных минералов, в первую очередь каолинита и бертьерина. Запасы глинозема, накопленные в эту эпоху, примерно вдвое превышают девнские.

Для бокситонакопления в мезозое отмечаются приуроченность месторождений к территориям паназии горных сооружений герцинид и киммерид в складчатых поясах Северного полушария. В это время формировались преимущественно карстовые бокситы, в меньшей степени осадочно-диагенетические на эпипалеозойских платформах и в единичных случаях латеритные на докембрийском субстрате. Отмечается преимущественно каолинит-гиббситовый состав платформенных разновидностей и диаспор-

бемитовый в складчатых поясах. На платформах преобладали низменные ландшафты с теплым гумидным климатом и каолиновыми КВ. Именно на мезозой приходится максимум каолинитонакопления в фанерозое [42].

В поздне триасовое-раннеюрское время формировались мелкие и средние месторождения с общими запасами первые сотни млн тонн. Основная часть месторождений образовалась в раннемеловое время при планации киммерийских горных сооружений, а также в поздне меловое время в континентальных перерывов. При этом на крупных месторождениях отмечается повышенная мощность залежей (до 15-17 м) и несколько продуктивных горизонтов [20], в том числе и унаследованных от поздне триасово-раннеюрской эпохи.

В кайнозое отмечается самый широкий ореол распространения бокситов по площади земной поверхности и самые крупные запасы этого вида минерального сырья. Именно в это время образовалось наибольшее количество крупных и суперкрупных месторождений. Большинство из них расположены на материках бывшей Гондваны. Для кайнозойских бокситов характерно тяготение к побережьям морских акваторий и островным зонам теплого гумидного климата с обилием влаги. Это определяет переход материнских минералов сразу в гиббсит

Месторождения приурочены к различным тектоническим структурам, но большинство из них развиты на докембрийских платформах. Меньше их на континентальных окраинах, в том числе островных дугах. Известны они в и пределах молодых платформ (Индокитайской, Казахстанской), где запасы глинозема могут составлять первые млрд тонн.

Бокситы палеогенового возраста – типичные латеритные, тогда как неогеновые комплексные осадочно-латеритные. Они развиты не только по материнским породам, но и продуктам переотложения глиноземных КВ (Сангареди, Уэйпа) имеют значительную мощность.

Спектр материнских пород латеритных КВ наиболее обширный. Он включает магматические (от кислых до основных), метаморфические и осадочные образования, все из них содержащие значительные количества алюмосиликатов. Преобладают латеритные типы бокситов, в меньшей степени латеритно-осадочные и карстовые. По минеральному составу они гиббситовые и бемит-гиббситовые

Заключение

Бокситы являются типичным полезным ископаемым формации коры выветривания. Их формирование связано с перерывами в осадконакоплении и континентальными режимами в регионах с благоприятными тектоническими, климатическими и другими факторами бокситонакопления. Первые бокситы фанерозоя появились в раннем кембрии в единичных участках складчатых поясов при их пенепленизации.

В эйфельском веке образовались первые промыш-

ленные месторождения этого вида минерального сырья высокого качества на Северном Урале. Во франкское время бокситонакопление расширилось на территорию Среднего Тимана. Количество известных девонских месторождений не превышают двух десятков, а их общие запасы составляют порядка одного млрд тонн.

В раннекаменноугольное время бокситонакопление сместилось на докембрийские платформы Северного полушария, а в их пределах – в периферийные части угленосных бассейнов. Оно продолжалось в среднем карбоне на Китайской и Северо-Американской платформах, а на территории Кореи вплоть до ранней перми. Формирование бокситов происходило в латеритную, диагенетическую и эпигенетическую стадии; в последнюю в случаях перекрытия бокситов угленосными отложениями. Активное участие в выветривании принимала органика с образованием бактериальных биоморфоз. В рассматриваемое время резко возросло количество месторождений (сотни) и их общие запасы до 4 млрд тонн.

Месторождения мезозойских бокситов тяготеют к складчатым поясам, а в их пределах к эпигерцинским и эпикиммерийским молодым платформам Северного полушария. Преобладает карстовый тип бокситов. Они имеют гиббсит-бемитовый состав у платформенных разновидностей и диаспор-бемитовый в подвергшихся складчатости участках. На докембрийских платформах преобладали низменные обводненные ландшафты с теплым гумидным климатом и каолиновыми КВ. Насчитывается более 1000 месторождений мезозойских бокситов, однако большинство из них мелких, хотя качество сырья в них высокое. Общие запасы глинозема мезозойских бокситов (3,3 млрд тонн) несколько меньше палеозойских, хотя месторождений больше.

Бокситонакопление в кайнозой приняло грандиозные масштабы. Это связано с расширением площадей выравненной суши с тропическим климатом, относительно высоким стоянием материков, их дроблением и увеличением прибрежных территорий с большим количеством осадков, обилие органики. Всё это привело к образованию мощных латеритных кор выветривания со многими крупными и суперкрупными месторождениями бокситов. Заметная доля в общих запасах приходится на месторождения островных дуг, но основные сосредоточены на материках бывшей Гондваны, особенно в Западной Африке и северо-востоке Южной Америки. При этом формировались латеритный латеритно-осадочный и карстовый типы гиббситового и бемит-гиббситового состава.

В целом же в течение фанерозоя эволюция бокситонакопления имела пульсационно-направленный тренд, выраженный в неравномерном увеличении площадей и запасов этого вида сырья со временем.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Зинчук Н. Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т. Историческая минералогия. В 3-х томах. Том 1. Введение в историческую минералогию. Воронеж: ВГУ. 2005. 587 с; Том 2. Историческая минералогия древних платформ. Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с. Том 3. Историческая минералогия подвижных суперпоясов. Воронеж: ВГУ. 622 с.
2. Савко А. Д., Бугельский Ю. Ю., Новиков В. М., Слукин А. Д., Шевырев Л. Т. Коры выветривания и связанные с ними полезные ископаемые. Воронеж : Изд-во «Истоки», 2007. 335 с.
3. Слукин А. Д. Коры выветривания и бокситы древних азиатских платформ: дисс. д-ра геол. мин. наук. М.: 1991. 510 с.
4. Богатырев Б. А. Месторождения подвижных поясов земной коры. Условия образования и размещения. Дисс. д-ра геол. мин. наук. М. 1999. - 86 с.
5. Новиков В. М. Современные и древние коры выветривания и бокситы Азии: На примере Вьетнама, Дальнего Востока и южной оконечности Урала: дисс. д-ра геол. мин. наук. М.: 2000. 446 с.
6. Шибистов Б. В. Латериты и континентальные бокситы. Красноярск, изд-во КНИИГиМС. 2000. 201 с.
7. Мамедов В. И., Буфеев Ю. В., Никитин Ю.А. Геология Гвинеиской республики. Т. 1. Изд-во МГУ, 2011. 341 с.
8. Мамедов В. И., Чаусов А. А., Оконов Е. А., Макарова М. А., Боева Н. М. Крупнейшая в Мире бокситоносная провинция Фута-Джалон-Мандино (Западная Африка). Часть I Общие сведения // *Геология рудных месторождений*. 2020. Том 62. № 2. С. 178–192.
9. Бушинский Г. И. Геология бокситов. М.: Недра, 1971. 415 с.
10. Михайлов Б. М. Эволюция обстановок бокситонакопления в истории Земли. *Проблемы генезиса бокситов*. М.: Наука, 1975. С. 57–68.
11. Богатырев Б. А., Жуков В. В. Эволюция бокситообразования в истории Земли // *Наука и технология в России*. 1995. Вып. 36. № 4. С. 6–7.
12. Савко А. Д. Эволюция геологических процессов и внешних геосфер в истории Земли. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 50. 2008. 172 с.
13. Богатырев Б. А., Жуков В. В., Цеховский Ю. Г. Бокситорудные эпохи фанерозоя // *Геология рудных месторождений*. 2009. Т. 51. № 6. С. 508–519.
14. Бардоши Д. Карстовые бокситы. Мир, 1981. 447 с.
15. Сапожников Д. Г. О закономерностях размещения и основах научного прогноза размещения бокситовых месторождений. *Экзогенное рудообразование (Al, Ni, Mn)*. М.: Наука, 1987. С. 178–189.
16. Сапожников Д. Г., Богатырев Б. А., Демина В. Н. Бокситоносность элювиально-осадочных комплексов в различных геотектонических областях СССР. *Рудоносность осадочных комплексов*. Л.: Наука, 1989. С. 186–194.
17. Михайлов Б. М. Региональные и локальные закономерности размещения бокситов. Л.: Недра, 1978. 68 с.
18. Никитина А. П., Слукин А. Д., Бугельский Ю. Ю. Закономерности распространения никелевых и бокситовых месторождений коры выветривания и практические рекомендации. *Экзогенное рудообразование (Al, Ni, Mn)*. М.: Наука, 1987. С. 105–110.
19. Ясаманов Н. А. Палеоклиматические условия эпох образования бокситов мезозоя и кайнозоя юга СССР. *Новые данные по геологии бокситов*. М.: ВИМС, 1975. Вып. III. С. 84–92.

20. Богатырев Б. А., Жуков В. В. Бокситорудные провинции Мира // *Геология рудных месторождений*. 2009. Т. 51. № 5. С. 379–396.
21. Богатырев Б. А., Жуков В. В., Цеховский Ю. Г. Условия образования и закономерности распространения крупных и уникальных месторождений бокситов // *Литология и полезные ископаемые*. 2009. №2. С. 149–168.
22. Синицин В. М. Климат латерита и боксита. Л.: Недра, 1976. 152 с.
23. Селиверстов Ю. П. Ландшафты и бокситы. Л.: Изд. ЛГУ, 1983. 260 с.
24. Платформенные бокситы СССР. Изд-во « Наука ». 1971. 387 с.
25. Бактериальная палеонтология. Под ред. А. Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.,
26. Школьник Э. Л., Жегалло Е. А., Богатырев Б. А., Бугельский Ю. Ю. Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения). Научный редактор: В. Т. Фролов. Москва, Эслан, 2004. 112 с.
27. Антошкина А. И. Бактериальное порообразование – реальность современных методов исследований // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. 2011. Т. 153. № 4. С. 114–126.
28. Слукин А. Д., Боева Н. М., Жегалло Е. А. Биоминералы латеритных бокситов – новые данные по результатам электронно-микроскопического изучения // *Новые данные о минералах*. 2016. № 51. С. 52–61.
29. Слукин А. Д., Боева Н. М., Жегалло Е. А., Бортников Н. С. Биогенное растворение кварца в процессе образования латеритных бокситов (по результатам электронно-микроскопического изучения) // *ДАН*. 2019. Т. 486 № 2. С. 228232.
30. Слукин А. Д., Бортников Н. С., Жегалло Е. А. Гиббсит и каолинит в зоне биологической педотурбации латеритного профиля: разные судьбы (на примере месторождений Сибири, Индии, Гвинеи и Бразилии) // *ДАН*. 2014. Т. 458. № 5. С. 572–577.
31. Георгиевский А. Ф., Жегалло Е. А., Бугина В. М. Микробиота бокситов месторождения Ева (Гвинея-Бисау) // *Литология и полезные ископаемые*. 2019. №6. С. 557–567.
32. Овчинникова М. Ю., Жегалло Е. А. Ископаемые микро-организмы и следы их жизнедеятельности в бокситах КМА // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 2. С. 141–146.
33. Таблица стран с запасами бокситов [Электронный ресурс]: URL: <https://aspektcenter.ru/tablitisa-stran-s-zapasami-boksitov/> (дата обращения: 5.01.2022)
34. Жабин В. В. Бокситы Боксонского месторождения – природный объект железоалюминиевого сырья, пригодного для безотходной переработки на малокремнистый ферросплав, глинозем и цемент // *Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири*. 2014. С. 34–36.
35. Антропова И. Г., Алексеева Е. Н., Доржиева О. У., Гуляшинов П. А., Палеев П. Л. Общая характеристика месторождений глиноземного сырья республика Бурятия и перспективы их освоения // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 11-2. С. 357–362.
36. Плякин А. М., Беляев В. В. Твёрдые полезные ископаемые Тимана: учеб. Пособие. Ухта: УГТУ, 2005. 92 с.
37. Вежаю-Ворыквинское месторождение алюминия [Электронный ресурс]: URL: <http://geomineal.ru/vezhayu-vorykvinskoe-mestorozhdenie-alyuminiya/> (дата обращения: 5.01.2022)
38. Георгиевский А. Ф., Бугина В. М., Тупе Люсьен. Месторождения латеритных бокситов Среднего Тимана // *Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования*. 2011. № 4. С. 51–55.
39. Демина В. Н. Шамозитизация и каолинизация бокситов Среднего Тимана. Вторичные изменения бокситов из месторождений СССР. М.: Наука, 1980. С. 200–218.
40. Демина В. Н., Лебедев В. А., Яцкевич Б. А. Закономерности формирования и размещения бокситов Щугорского месторождения на Среднем Тимане. *Кора выветривания*. Вып. 18. М.: Наука, 1983. С. 165–178.
41. Вахрушев А. В., Лютоев В. П., Силаев В. И. Кристаллохимические особенности железистых минералов в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман) // *Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН*. 2012. № 10. С. 14–18
42. Савко А. Д., Крайнов А. В. Эволюция каолинитонакопления в фанерозе // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 3 С. 4–24. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3647>
43. Сиротин В. И., Белявцева Е. Е. Бокситы КМА. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 93. 2016. 104 с.
44. Никулин И. И., Сиротин В. И. Литолого-фациальный анализ линейных кор выветривания железистых кварцитов Белгородского рудного района КМА // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. №2. С. 45–52.
45. Овчинникова М. Ю., Савко А. Д. Коры выветривания пород железисто-кремнисто-сланцевой формации КМА. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 105. 2020. 102 с.
46. Савко А. Д., Овчинникова М. Ю., Боева Н. М. Бертьериновы бокситы Курской магнитной аномалии (КМА) // *Литология и полезные ископаемые*. 2021. № 1. С. 54–61.
47. Сайт Архангельской области [Электронный ресурс]: URL: https://www.edu.severodvinsk.ru/after_school/obl_www/2013/work/lok/population.html (дата обращения: 5.01.2022)
48. Сиротин В. И., Акаемов С. Т., Бунеев В. Н., Налбандов В. А. Бокситы Северо-Онежского района // *Изв. АН СССР. Сер. Геол.* 1988. № 7. С. 78–92.
49. Сиротин В. И., Белявцева Е. Е. О соотношении промывного и проточного гидролиза образования бокситов (на примере КМА и Северной Онеги) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2008. № 2. С. 44–53.
50. Северо-Онежский бокситовый рудник [Электронный ресурс]: URL: http://machinepedia.org/index.php?title=Северо-Онежский_бокситовый_рудник (дата обращения: 5.01.2022)
51. Основные запасы разведанных бокситов и крупнейшие производители алюминия [Электронный ресурс]: URL: <http://www.mining-portal.ru/publish/osnovnyie-zapasyi-razvedannyih-boksitov-i-krupneyshie-proizvoditeli-alyuminiya/> (дата обращения: 5.01.2022)
52. Liu X., Wang Q., Zhao L., Peng Y., Ma Y., Zhou Z. Metallogeny of the large-scale Carboniferous karstic bauxite in the Sanmenxia area, southern part of the North China Craton, China // *Chemical Geology*. 2020. Vol. 556. 119851 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119851>.
53. Yu W., Algeo Th. J., Yan J., Yang J., Du Y., Huang X., Weng S. Climatic and hydrologic controls on upper Paleozoic bauxite deposits in South China // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 189. P.159–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.014>
54. Sun L., Zhang S., Zhang S., Liu J., Xiao K., Geologic characteristics and potential of bauxite in China // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 120. 103278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103278>

55. Мир проблемы и тенденции [Электронный ресурс]: URL: <https://mineral.ru/Analytics/worldtrend/index.html> (дата обращения: 5.01.2022)
56. Валетон И. Бокситы. М.: Мир. 1974. 215 с.
57. Сигов А. П. Коры выветривания, литологические типы осадков и гипергенная металлогения Урала. *Минералогия зоны гипергенеза*. М.: Наука, 1980. С. 181–180.
58. Новиков В. М. Латеритные и осадочные бокситы Мугоджар и Орского Зауралья. М.: Наука, 1980. 118 с.
59. Богатырев Б. А. Триас-юрские коры выветривания и бокситы юга Средней Азии и Кавказа. М.: Наука, 1980. 199 с.
60. Условия образования и факторы сохранности бокситовых месторождений СССР. М.: Наука, 1983. 208 с.
61. Средиземноморская бокситоносная провинция [Электронный ресурс]: URL: <https://bigenc.ru/geology/text/4161078> (дата обращения: 5.01.2022)
62. Лисицина Н. А., Пастухова М. В. Структурные типы бокситов Казахстана и Западной Сибири. *Тр. ГИН*. Вып. 95. 1963. 98 с.
63. Месторождение бокситов Казахстана [Электронный ресурс]: URL: <https://lektcii.org/6-4967.html> (дата обращения: 5.01.2022)
64. Полезные ископаемые Греции [Электронный ресурс]: URL: <http://www.mining-enc.ru/g/greciya> (дата обращения: 5.01.2022)
65. Мамедов В. И. Геология и полезные ископаемые Республики Гвинеи-Бисау. М.: Зарубежгеология, 1980. 196 с.
66. Михайлов Б. М. Геология и полезные ископаемые западных районов Либерийского щита. М.: Недра, 1969. 179 с.
67. Акаемов С. Т., Пастухова М. В., Теняков В. А., Ясаманов Н. А. Время и условия формирования бокситов латеритных покровов экваториальной зоны Земли. В кн.: *Проблемы генезиса бокситов*. М.: Наука, 1975. С. 55–77.
68. Сапожников Д. Г., Богатырев Б. А., Барков В. В. Бокситы и коры выветривания Гвинеи. *Коры выветривания*. М.: Наука, 1976. Вып. 15. С. 3–50
69. Богатырев Б. А. Латеритные покровы современной тропической зоны Земли // *Литология и полезные ископаемые*. 1981. № 4. С. 85–100.
70. Bardossy G., Aleva G.J.J. Lateritic Bauxites. *Developments in Economic Geology*. 27, Elsevier Sci. Publ., 1990. 624 p.
71. Sidibe M., Yalcin M.G., Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa // *Journal of African Earth Sciences*. 2019. Vol. 149. P. 348–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.08.017>.
72. Мамедов В. И., Чаусов А. А., Канищев А. И. Этапы формирования уникальной бокситоносной серии Сангареди (провинция Фута Джалон-Мандинго, Западная Африка) // *Геология рудных месторождений*. 2011. Т. 53. № 3. С. 203–229
73. Valetton I. Tertiary bauxites and associated laterite-derived sediments in India // *Quaternary International*. 1998. Vol. 51–52, P. 44. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)90211-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)90211-7).
74. Новиков В. М., Нгуен Чонг Чем, Нгуен Дик Зи, Нгуен Суан Дао, Зубарев В. И. Латеритные бокситы в коре выветривания гранитов Южного Вьетнама // *Геол. рудн. мест.* 1985. Т. XXVII. №4. С. 116–120.
75. Новиков В. М., Ле Дык Ан, Нгуен Нгок Куинь. Месторождения латеритных бокситов Южного Вьетнама // *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 289. №3. С. 692–695.
76. Месторождения полезных ископаемых Индонезия [Электронный ресурс]: URL: <https://catalogmineralov.ru/deposit/indoneziya/> (дата обращения: 5.01.2022)
77. Месторождения геосинклинальных бокситов [Электронный ресурс]: URL: <https://industrial-wood.ru/mestorozhdeniya-cvetnyh-metallov/33530-mestorozhdeniya-geosinklinalnyh-boksitov.html> (дата обращения: 5.01.2022)
78. Митчелл-Плато [Электронный ресурс]: URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geo/6712/%D0%9C%D0%B8%D1%82%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BB (дата обращения: 5.01.2022)
79. Лисицина Н. А. Вынос химических элементов при выветривании основных пород. М.: Наука. 1973. 235 с.
80. Михайлов Б. М., Куликова Г. В. Фациальный анализ кор выветривания. Л.: Недра, 1977. 158 с.
81. Никитина А. П. Древняя кора выветривания кристаллического фундамента Воронежской антеклизы и ее бокситоносность. М.: Наука, 1968. 159 с.
82. Бушинский Г. И. О выветривании, промывном гидролизе и проточном диагенезе // *Литология и полезные ископаемые*. – 1977. – № 6. – С. 32–43.
83. Violante A., Huang P. M. Influence of inorganic and organic ligands on the formation of aluminium hydroxides and oxyhydroxides // *Clays and Clay Mineral*. 1985. V. 33. P. 181–192.
84. Violante A., Violante P. Influence of pH, concentration, and chelating power of organic anions on the syntheses of aluminium hydroxides and oxyhydroxides // *Clays and Clay Mineral*. 1980. V. 28. P. 425–434.
85. Новакова А. А., Должикова А. В., Новиков В. М., Боева Н. М., Жегалло Е. А. Сравнительное исследование структурно-морфологических особенностей биогенных и синтезированных наночастиц гетита // *Кристаллография*. 2017. Т. 62. № 6. С. 981–985.
86. Toth T. A., Fritz S. J. An Fe-berthierine from a cretaceous laterite: Part I. Characterization // *Clays and Clay Minerals*. 1997. Vol. 45. No. 4. P. 564–579.
87. Maynard J. B. *Geochemistry of sedimentary are deposits*. New York; Heidelberg; Berlin. 1983. 202 p.
88. Bhattacharyya D.R. Origin of berthierine in ironstones // *Clays and Clay Minerals*. 1983. V. 31. P. 173–182.
89. Hornibrook E.R.C., Longstaffe F. J. Berthierine from the lower cretaceous clearwater formation, Alberta, Canada // *Clays and Clay Minerals*. 1996. V.44. P. 1–21.
90. Velde B., Meunier A. *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Verlag – Berlin – Heidelberg, Springer, 2008. 406 p.
91. Сиротин В. И., Бунеев В. Н. Палеоландшафты визейского карбонатакопления юго-западного склона Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2007. № 1. С. 11–22.
92. Наймарк Е. Б., Компанцева Е. И., Комова А. В. Взаимодействие аноксигенных фототрофных бактерий rhodospirillum sp. с каолинитом // *Микробиология*. 2009. Т. 78. № 6. С. 786–795.
93. Добровольский В. В. География и палеогеография коры выветривания СССР. М., 1969. 228 с.
94. Савко, А. Д., Додатко А. Д. Коры выветривания в геологической истории Восточно–Европейской платформы. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 231 с.
95. Салтыков В. Ф. Распределение полиморфных модификаций гидроксидов алюминия в аллофан-гипсбитовых породах Поволжья // *Литология и полезные ископаемые*. 2009. №4. С. 374–383.
96. Клекль В. Н., Никитина А. П., Талько Ю. К. Минералогические особенности бокситов. *Кора выветривания*. 1991. Вып. 20. С. 157–165.
97. Mu N., Schulz H.-M., Fu Y., Schovsbo N. H., Wirth R., Rhede D., van Berk W. Berthierine formation in reservoir rocks from the Siri oilfield (Danish North Sea) as result of fluid-rock interactions: Part I. Characterization // *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Vol. 65. P.302–311.
98. Савко А. Д. Историческая геология: учебное пособие. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. 391 с.

The evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic

©2022 A. D. Savko[✉], M. Yu. Ovchinnikova

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

Abstract

Introduction: Bauxites are the main raw material for aluminium production. They are associated with weathering crust formations (WCF) and are represented by laterites, colluvial, deluvial-proluvial, karst, alluvial, and lacustrine-marshy formations. Hundreds of publications by many authors have been dedicated to various aspects of bauxite geology, including those on the evolution of bauxite accumulation. These works distinguishing different periods of bauxite accumulation followed the actualistic approach (“the present is the key to the past”). However, the recognition of evolution requires considering the features of each of the periods in the context of changing tectonic regimes and climates, as well as the influence of organic matter on the weathering. These aspects are discussed in the article.

Methodology and scope of work: The main research methods included the comparative-lithological and historical-geological methods. A lot of attention was paid to interruptions in sedimentation during which lateritic WCs could be formed. These periods correspond to the periods of bauxite formation. It was necessary to identify the features of each of the periods in order to establish the evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic. This article is based on the data presented in a three-volume collection “Historical Minerageny” [1] and the monograph [2]. Meanwhile, the factual base of the world minerageny is being rapidly updated. Therefore, whenever possible, we used materials from various sources as of 2021, including data on numerous deposits of bauxite-bearing WCF in the world.

Results and discussion: The first Phanerozoic bauxites appeared in the Early Cambrian in isolated areas of fold belts during their peneplanation. In the Eifelian, payable deposits of high quality were formed in the Northern Urals. During the Frasnian, bauxite accumulation expanded into the territory of the Middle Timan. The number of known Devonian deposits does not exceed two dozen and their total reserves are about a billion tonnes. In the Early Carboniferous, bauxite accumulation shifted to the Precambrian platforms of the Northern hemisphere and within them to the peripheral parts of coal-bearing basins. It continued in the Middle Carboniferous on the Chinese and North American platforms, whereas on the territory of Korea it lasted till the Early Permian. Bauxites formed in the lateritic, diagenetic, and epigenetic stages. During the latter, it happened when bauxites were overlapped by coal-bearing deposits. Organics took an active part in weathering which resulted in the formation of bacterial biomorphoses. The number of deposits sharply increased (hundreds) and their total reserves increased to 4 billion tonnes. Deposits of Mesozoic bauxites tend to be found in fold belts, and within them in the Epihercynian and Epicimmerian young platforms of the Northern hemisphere. The karst type of bauxites predominates. They have a gibbsite-boehmite composition in platform varieties and a diasporite-boehmite composition in areas subjected to folding. The Precambrian platforms were dominated by low wet landscapes with a warm humid climate and kaolin WCs. There are more than 1,000 deposits of Mesozoic bauxites, however, most of them are



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

small, although the quality of the raw material is high. The total alumina reserves of the Mesozoic bauxites (3.3 billion tonnes) are somewhat less than those of the Paleozoic bauxites but their deposits are more numerous. Bauxite accumulation in the Cenozoic was on a grandiose scale. This was due to the expansion of the areas of levelled land with a tropical climate, a relatively high stand of the continents, their fragmentation, and the increase in coastal areas with a large amount of precipitation, and an abundance of organic matter. All this led to the formation of powerful lateritic weathering crusts with many large and super-large bauxite deposits. A significant share in the total reserves falls on the deposits of island arcs, however, the main deposits are concentrated on the continents of the former Gondwana, especially in West Africa and in the north-east of South America. In these areas lateritic, lateritic-sedimentary, and karst types of WCs of gibbsitic and boehmite-gibbsitic composition were formed.

Conclusion: In general, during the Phanerozoic, the evolution of bauxite accumulation was of pulsating directional character expressed in an uneven increase in the area and reserves of this type of raw material with time.

Keywords: evolution, bauxites, weathering crust, laterites, gibbsite, boehmite, diaspore.

For citation: Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu. The evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 4–33. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9096>

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

REFERENCES

- 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.)
- 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 related minerals]. Voronezh, «Istoki» publ., 2007, 335 p. (In Russ.)
- Slukin A. D. *Kory vyvetrivaniya i boksity drevnikh aziatskikh platform*. Diss. d-ra geol. min. nauk [Weathering crusts and bauxites of ancient Asian platforms. Diss. Dr. geol. min. Sciences.]. Moscow, 1991, 510 p. (In Russ.)
- Bogatyrev B. A. *Mestorozhdeniya podvizhnykh pojasov zemnoi kory. Usloviya obrazovaniya i razmeshcheniya*. Diss. d-ra geol. min. nauk [Deposits of mobile belts of the earth's crust. Conditions of education and placement. Diss. Dr. geol. min. Sciences.]. Moscow, 1999, 86 p. (In Russ.)
- Novikov V. M. *Sovremennye i drevnie kory vyvetrivaniya i boksity Azii: Na primere V'etnama, Dal'nego Vostoka i yuzhnoi okonechnosti Urala: diss. d-ra geol. min. nauk* [Modern and ancient weathering crusts and bauxites of Asia: On the example of Vietnam, the Far East and the southern extremity of the Urals: diss. Dr. geol. min. Sciences.]. Moscow, 2000. 446 p. (In Russ.)
- Shibistov B. V. *Laterity i kontinental'nye boksity* [Laterites and continental bauxites]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS publ., 2000, 201 p. (In Russ.)
- Mamedov V. I., Bufeev Yu. V., Nikitin Yu. A. *Geologiya Gvineiskoi respubliki* [Geology of the Republic of Guinea]. Vol 1. MGU, 2011 publ., 341 p. (In Russ.)
- Mamedov V. I., Chausov A. A., Okonov E. A., Makarova M. A., Boeva N. M. *Krupneishaya v Mire boksitonosnaya provintsiya Futa-Dzhalon-Mandino (Zapadnaya Afrika). Chast' I Obshchie svedeniya* [The world's largest bauxite-bearing province Futa-Jalon-Mandino (West Africa). Part I General information]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of ore deposits*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 178–192. (In Russ.)
- Bushinskii G. I. *Geologiya boksitov* [Geology of bauxites]. Moscow, Nedra publ., 1971, 415 p. (In Russ.)
- Mikhailov B. M. *Evolutsiya obstanovok boksitonakopleniya v istorii Zemli* [Evolution of bauxite accumulation environments in the history of the Earth]. *Problemy genezisa boksitov* [Problems of bauxite genesis]. Moscow, Nauka publ., 1975, pp. 57–68. (In Russ.)
- Bogatyrev B. A., Zhukov V. V. *Evolutsiya boksitooobrazovaniya v istorii Zemli* [Evolution of bauxite formation in the history of the Earth]. *Nauka i tekhnologiya v Rossii – Science and technology in Russia*, 1995, vol. 36, no. 4, pp. 6–7. (In Russ.)
- Savko A. D. *Evolutsiya geologicheskikh protsessov i vneshnikh geosfer v istorii Zemli* [Evolution of geological processes and external geospheres in the history of the Earth]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 50, 2008, 172 p.
- Bogatyrev B. A., Zhukov V. V., Tsekhovskii Yu. G. *Boksitorudnye epokhi fanerozoia* [Boxite ore epochs of the Phanerozoic]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 508–519. (In Russ.)
- Bardoshi D. *Karstovye boksity* [Karst bauxites]. Mir publ., 1981. 447 p. (In Russ.)
- Sapozhnikov D. G. *O zakonomernostyakh razmeshcheniya i osnovakh nauchnogo prognoza razmeshcheniya boksitovykh mestorozhdenii* [On the patterns of placement and the basics of the scientific forecast for the placement of bauxite deposits.]. *Ekzogennoe rudoobrazovanie (Al, Ni, Mn)* [Exogenous ore formation (Al, Ni, Mn)]. Moscow, Nauka publ., 1987, pp. 178–189. (In Russ.)
- Sapozhnikov D. G., Bogatyrev B. A., Demina V. N. *Boksitonosnost' elyuvial'no-osadochnykh kompleksov v razlichnykh geotektonicheskikh oblastyakh SSSR* [Bauxite-bearing of eluvial-sedimentary complexes in various geotectonic regions of the USSR]. *Rudonosnost' osadochnykh kompleksov* [Ore content of sedimentary complexes]. Leningrad, Nauka publ., 1989, pp. 186–194. (In Russ.)
- Mikhailov B. M. *Regional'nye i lokal'nye zakonomernosti*

razmeshcheniya boksitov [Regional and local patterns of bauxite distribution.]. Leningrad, Nedra publ., 1978, 68 p. (In Russ.)

18. Nikitina A. P., Slukin A. D., Bugel'skii Yu. Yu. Zakonomernosti rasprostraneniya nikel'nykh i boksitovykh mestorozhdenii kory vyvetrivaniya i prakticheskie rekomendatsii [Patterns of distribution of nickel and bauxite deposits of the weathering crust and practical recommendations]. *Ekzogennoe rudoobrazovanie (Al, Ni, Mn)* [Exogenous ore formation (Al, Ni, Mn)]. Moscow, Nauka publ., 1987, pp. 105–110. (In Russ.)

19. Yasamanov N. A. Paleoklimaticheskie usloviya epokh obrazovaniya boksitov mezozoya i kainozoya yuga SSSR [Paleoclimatic conditions of the epochs of formation of Mesozoic and Cenozoic bauxites in the south of the USSR]. *Novye dannye po geologii boksitov* [New data on bauxite geology]. Moscow, VIMS, 1975, vol. III, pp. 84–92. (In Russ.)

20. Bogatyrev B. A., Zhukov V. V. Boksitorudnye provintsii Mira [Boxitore Provinces of the World]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 5, pp. 379–396. (In Russ.)

21. Bogatyrev B. A., Zhukov V. V., Tsekhovskii Yu. G. Usloviya obrazovaniya i zakonomernosti rasprostraneniya krupnykh i unikal'nykh mestorozhdenii boksitov [Conditions of formation and distribution patterns of large and unique bauxite deposits]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 2009, no. 2, pp. 149–168. (In Russ.)

22. Sinitsin V. M. *Klimat laterita i boksita* [Climate of laterite and bauxite]. Leningrad, Nedra publ., 1976, 152 p. (In Russ.)

23. Seliverstov Yu. P. *Landshafty i boksity* [Landscapes and bauxites]. Leningrad, LGU publ., 1983, 260 p. (In Russ.)

24. *Platformennyye boksity SSSR* [Platform bauxites of the USSR]. Moscow, Nauka publ., 1971, 387 p. (In Russ.)

25. *Bakterial'naya paleontologiya* [Bacterial paleontology]. Ed. A. Yu. Rozanova. Moscow, PIN RAN publ., 2002, 188 p. (In Russ.)

26. Shkol'nik E. L., Zhegallo E. A., Bogatyrev B. A., Bugel'skii Yu. Yu. *Biomorfnyye struktury v boksitakh (po rezul'tatam elektronno-mikroskopicheskogo izucheniya)* [Biomorphic structures in bauxites (according to the results of electron microscopic study)]. Scientific editor: V. T. Frolov, Moscow, Eslan publ., 2004, 112 p. (In Russ.)

27. Antoshkina A. I. Bakterial'noe porodoobrazovanie – real'nost' sovremennykh metodov issledovaniya [Bacterial rock formation - the reality of modern research methods]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki – Scientific notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*, 2011, vol. 153, no. 4, pp. 114–126. (In Russ.)

28. Slukin A. D., Boeva N. M., Zhegallo E. A. Biomineraly lateritnykh boksitov – novye dannye po rezul'tatam elektronno-mikroskopicheskogo izucheniya [Biominerals of lateritic bauxites – new data on the results of electron microscopy study]. *Novye dannye o mineralakh – New data on minerals*, 2016, no. 51, pp. 52–61. (In Russ.)

29. Slukin A.D., Boeva N.M., Zhegallo E.A., Bortnikov N.S. Biogennoe rastvorenie kvartsa v protsesse obrazovaniya lateritnykh boksitov (po rezul'tatam elektronno-mikroskopicheskogo izucheniya) [Biogenic dissolution of quartz during the formation of lateritic bauxites (according to the results of an electron microscopic study)]. *DAN Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 486, no. 2, pp. 228–232. (In Russ.)

30. Slukin A. D., Bortnikov N. S., Zhegallo E. A. Gibbsit i kaolinit v zone biologicheskoi pedoturbatsii lateritnogo profilya: raznye sud'by (na primere mestorozhdenii Sibiri, Indii, Gvinei i Brazili) [Gibbsite and kaolinite in the laterite profile biological pedoturbation zone: different fates (on the example of deposits in Siberia, India, Guinea, and Brazil)]. *DAN – Reports of the Academy of Sciences*, 2014, vol. 458, no. 5, pp. 572–577. (In Russ.)

31. Georgievskii A. F., Zhegallo E. A., Bugina V. M. Mikrobiota boksitov mestorozhdeniya Eva (Gvineya-Bisau) [Microbiota of bauxites of the Eva deposit (Guinea-Bissau)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 2019, no. 6, pp. 557–567. (In Russ.)

32. Ovchinnikova M. Yu., Zhegallo E. A. Iskopaemye mikroorganizmy i sledy ikh zhiznedeyatel'nosti v boksitakh KMA [Fossil microorganisms and traces of their vital activity in bauxites of the KMA]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 2, pp. 141–146. (In Russ.)

33. Tablitsa stran s zapasami boksitov [Table of countries with bauxite reserves]: Available at: <https://aspektcenter.ru/tablitasa-stran-s-zapasami-boksitov/> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)

34. Zhabin V. V. Boksity Boksonskogo mestorozhdeniya – prirodnyi ob'ekt zhelezoaluminievogo syr'ya, prigodnogo dlya bezotkhodnoi pererabotki na malokremnistyi ferrosilitsii, glinozem i tsement [Bauxites of the Bokson deposit as a natural object of iron-aluminum raw materials suitable for waste-free processing into low-silicon ferrosilicon, alumina, and cement]. *Geologiya, geofizika i mineral'noe syr'e Sibiri – Geology, geophysics and mineral raw materials of Siberia*, 2014, pp. 34–36. (In Russ.)

35. Antropova I. G., Alekseeva E. N., Dorzhieva O. U., Gulyashinov P. A., Paleev P. L. Obschchaya kharakteristika mestorozhdenii glinozemnogo syr'ya respublika Buryatiya i perspektivy ikh osvoeniya [General characteristics of alumina deposits in the Republic of Buryatia and prospects for their development]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 11-2, pp. 357–362. (In Russ.)

36. Plyakin A. M., Belyaev V. V. *Tverdye poleznye iskopaemye Timana: ucheb. posobie* [Solid minerals of Timan: textbook. Benefit.]. Ukhta, UGTU publ., 2005, 92 p. (In Russ.)

37. Vezhayu-Vorykvinskoe mestorozhdenie alyuminiya [Vezhayu-Vorykvinskoe aluminum deposit]: Available at: <http://geomineal.ru/vezhayu-vorykvinskoe-mestorozhdenie-alyuminiya/> (accesses 5.01.2022) (In Russ.)

38. Georgievskii A. F., Bugina V. M., Tupe Lyus'en. Mestorozhdeniya lateritnykh boksitov Srednego Timana [Deposits of lateritic bauxites in the Middle Timan]. *Vestnik RUDN. Seriya Inzhenernye issledovaniya – Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series Engineering Research*, 2011, no. 4, pp. 51–55. (In Russ.)

39. Demina V. N. Shamositizatsiya i kaolinitizatsiya boksitov Srednego Timana [Shamositization and kaolinitization of bauxites in the Middle Timan]. *Vtorichnye izmeneniya boksitov iz mestorozhdenii SSSR* [Secondary alterations of bauxites from deposits of the USSR]. Moscow, Nauka publ., 1980, pp. 200–218. (In Russ.)

40. Demina V. N., Lebedev V. A., Yatskevich B. A. Zakonomernosti formirovaniya i razmeshcheniya boksitov Shchugorskogo mestorozhdeniya na Srednem Timane [Patterns of Formation and Distribution of Bauxites at the Shchugorskoe Deposit in the Middle Timan]. *Kora vyvetrivaniya* [Weathering crust], vol. 18, Moscow, Nauka publ., 1983, pp. 165–178. (In Russ.)

41. Vakhrushev A. V., Lyutoev V. P., Silaev V. I. Kristallohimicheskie osobennosti zhelezistykh mineralov v boksitakh Vezhayu-Vorykvinskogo mestorozhdeniya (Srednii Timan) [Crystal-chemical features of iron minerals in bauxites of the Vezhayu-Vorykvinskoe deposit (Middle Timan)]. *Vestn. In-ta geol. Komi NTs UrO RAN – Bulletin of the Institute of Geol. Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 10, pp. 14–18. (In Russ.)

42. Savko A. D., Krainov A. V. Evolution of kaolinite accumulation in the Phanerozoic. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voro-*

- nezh State University. Series: Geology, 2021, no. 3, pp. 4–24. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3647>
43. Sirotin V. I., Belyavtseva E. E. Boksity KMA [Bauxites KMA]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 93, 2016, 104 p. (In Russ.)
44. Nikulin I. I., Sirotin V. I. Litologo-fatsial'nyi analiz lineinykh kor vyvetrivaniya zhelezistykh kvartsitov Belgorodskogo rudnogo raiona KMA [Lithological-facies analysis of linear weathering crusts of ferruginous quartzites of the Belgorod ore region of the KMA]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 2, pp. 45–52. (In Russ.)
45. Ovchinnikova M. Yu., Savko A. D.. Kory vyvetrivaniya porod zhelezisto-kremnisto-slantsevoi formatsii KMA [Weathering crusts of rocks of the iron-siliceous-shale formation of the KMA]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 105, 2020, 102 p. (In Russ.)
46. Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu., Boeva N. M. Bert'erinovye boksity Kurskoi magnitnoi anomalii (KMA) [Berthierin rich bauxites of the Kursk magnetic anomaly (KMA)] *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and Minerals*, 2021, no. 1, pp. 54–61. (In Russ.)
47. Sait Arkhangel'skoi oblasti [Website of the Arkhangelsk region]: Available at: https://www.edu.severodvinsk.ru/after_school/obl_www/2013/work/lok/population.html (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
48. Sirotin V. I., Akaemov S. T., Buneev V. N., Nalbandov V. A. Boksity Severo-Onezhskogo raiona [Bauxites of the North Onega region] *Izv. An SSSR. Ser. Geol. – News of the USSR Academy of Sciences. Ser. Geology*, 1988, no. 7, pp. 78–92. (In Russ.)
49. Sirotin V. I., Belyavtseva E. E. O sootnoshenii promyvnogo i protochnogo gidroliza obrazovaniya boksitov (na primere KMA i Severnoi Onegi) [On the ratio of washing and flow hydrolysis of bauxite formation (on the example of KMA and Northern Onega)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2008, no. 2, pp. 44–53. (In Russ.)
50. Severo-Onezhskii boksitovyi rudnik [Severo-Onega bauxite mine]: Available at: http://machinepedia.org/index.php?title=Severo-Onezhskii_boksitovyi_rudnik (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
51. Osnovnye zapasy razvedannykh boksitov i krupneishie proizvoditeli alyuminiya [The main reserves of explored bauxites and the largest producers of aluminum]: Available at: <http://www.mining-portal.ru/publish/osnovnyie-zapasyi-razvedannyih-boksitov-i-krupneyshie-proizvoditeli-alyuminiya/> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
52. Liu X., Wang Q., Zhao L., Peng Y., Ma Y., Zhou Z. Metallogeny of the large-scale Carboniferous karstic bauxite in the Sanmenxia area, southern part of the North China Craton, China. *Chemical Geology*, 2020, vol. 556, 119851 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119851>.
53. Yu W., Algeo Th. J., Yan J., Yang J., Du Y., Huang X., Weng S. Climatic and hydrologic controls on upper Paleozoic bauxite deposits in South China, *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 189, pp. 159–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.014>
54. Sun L., Zhang S., Zhang S., Liu J., Xiao K., Geologic characteristics and potential of bauxite in China. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 120, 103278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103278>
55. Mir – problemy i tendentsii [World – problems and trends]: Available at: <https://mineral.ru/Analytics/worldtrend/index.html> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
56. Valetov I. *Boksity* [Bauxites]. Moscow, Mir publ., 1974, 215 p. (In Russ.)
57. Sigov A. P. Kory vyvetrivaniya, litologicheskie tipy osadkov i gipergennaya metallogeniya Urala [Weathering Crusts, Lithological Types of Sediments, and Hypergene Metallogeny of the Urals]. *Minerageniya zony gipergeneza* [Minerageny of the hypergenesis zone]. Moscow, Nauka publ., 1980, pp. 181–180. (In Russ.)
58. Novikov V. M. *Lateritnye i osadochnye boksity Mugodzhari i Orskogo Zaural'ya* [Lateritic and sedimentary bauxites of Mugodzhari and Orsk Trans-Urals]. Moscow, Nauka publ., 1980, 118 p. (In Russ.)
59. Bogatyrev B.A. *Trias-yurskie kory vyvetrivaniya i boksity yuga Srednei Azii i Kavkaza* [Triassic-Jurassic weathering crusts and bauxites of the south of Central Asia and the Caucasus]. Moscow, Nauka publ., 1980. 199 p. (In Russ.)
60. *Usloviya obrazovaniya i faktory sokhrannosti boksitovykh mestorozhdenii SSSR* [Conditions of formation and safety factors of bauxite deposits in the USSR]. Moscow, Nauka publ., 1983, 208 p. (In Russ.)
61. Credizemnomorskaya boksito-nosnaya provintsiiya [Mediterranean bauxite-bearing province]: Available at: <https://bigenc.ru/geology/text/4161078> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
62. Lisitsina N. A., Pastukhova M. V. Strukturnye tipy boksitov Kazakhstana i Zapadnoi Sibiri [Structural types of bauxites in Kazakhstan and Western Siberia]. *Tr. GIN* [Proceedings of GIN], vol. 95, 1963, 98 p. (In Russ.)
63. Mestorozhdenie boksitov Kazakhstana [Bauxite deposit in Kazakhstan]: Available at: <https://lektcii.org/6-4967.html> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
64. Poleznye iskopaemye Gretsii [Minerals of Greece]: Available at: <http://www.mining-enc.ru/g/greciya> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
65. Mamedov V. I. *Geologiya i poleznye iskopaemye Respubliki Gvinei-Bisau* [Geology and minerals of the Republic of Guinea-Bissau]. Moscow, Zarubezhgeologiya publ., 1980, 196 p. (In Russ.)
66. Mikhailov B.M. *Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnykh raionov Liberiiskogo shchita* [Geology and minerals of the western regions of the Liberian shield]. Moscow, Nedra publ., 1969. 179 p. (In Russ.)
67. Akaemov S. T., Pastukhova M. V., Tenyakov V. A., Yasamanov N. A. Vremya i usloviya formirovaniya boksitov lateritnykh pokrovov ekvatorial'noi zony Zemli [Time and Conditions of Bauxite Formation in the Lateritic Covers of the Earth's Equatorial Zone]. V kn.: *Problemy genezisa boksitov* [In: Problems of bauxite genesis.]. Moscow, Nauka publ., 1975, pp. 55–77. (In Russ.)
68. Sapozhnikov D. G., Bogatyrev B. A., Barkov V. V. Boksity i kory vyvetrivaniya Gvinei [Bauxites and weathering crusts of Guinea]. *Kory vyvetrivaniya* [Weathering crusts]. Moscow, Nauka publ., 1976, vol. 15, pp. 3–50 (In Russ.)
69. Bogatyrev B. A. Lateritnye pokrovy sovremennoi tropicheskoi zony Zemli [Laterite covers of the modern tropical zone of the Earth]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 1981, no. 4, p. 85–100. (In Russ.)
70. Bardossy G., Aleva G.J.J. Lateritic Bauxites. Developments in Economic Geology. 27, Elsevier Sci. Publ., 1990. 624 p.
71. Sidibe M., Yalcin M.G., Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, vol. 149, pp. 348–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.08.017>.

72. Mamedov V. I., Chausov A. A., Kanishchev A. I. Etapy formirovaniya unikal'noi boksitosnoi serii Sangaredi (provintsiya Futa Dzhalon-Mandingo, Zapadnaya Afrika) [Stages of formation of the unique bauxite-bearing Sangaredi series (Futa Jalon-Mandingo province, West Africa)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of Ore Deposits*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 203–229. (In Russ.)
73. Valetton I. Tertiary bauxites and associated laterite-derived sediments in India. *Quaternary International*, 1998, vol. 51–52, pp. 44. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)90211-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)90211-7).
74. Novikov V. M., Nguen Chong Chem, Nguen Dik Zi, Nguen Suan Dao, Zubarev V. I. Lateritnye boksity v kore vyvetrivaniya granitov Yuzhnogo V'etnama [Lateritic bauxites in the weathering crust of South Vietnamese granites]. *Geol. rudn. mest. – Geology of ore places*, 1985, vol. XXVII, no. 4, pp. 116–120. (In Russ.)
75. Novikov V. M., Le Dyk An, Nguen Ngok Kuin'. Mestorozhdeniya lateritnykh boksitov Yuzhnogo V'etnama [Lateritic bauxite deposits in South Vietnam]. *Dokl. AN SSSR – Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1986, vol. 289, no. 3, pp. 692–695. (In Russ.)
76. Mestorozhdeniya poleznykh iskopaemykh Indoneziya [Deposits of minerals Indonesia]: Available at: <https://catalogmineralov.ru/deposit/indoneziya/> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
77. Mestorozhdeniya geosinklinal'nykh boksitov [Deposits of geosynclinal bauxites]: Available at: <https://industrialwood.ru/mestorozhdeniya-cvetnyh-metallov/33530-mestorozhdeniya-geosinklinalnyh-boksitov.html> (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
78. Mitchell-Plato [Mitchell Plateau]: Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geo/6712/%D0%9C%D0%B8%D1%82%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BB (accessed 5.01.2022) (In Russ.)
79. Lisitsina N. A. *Vynos khimicheskikh elementov pri vyvetrivanii osnovnykh porod* [Removal of chemical elements during weathering of basic rocks]. Moscow, Nauka publ., 1973, 235 p. (In Russ.)
80. Mikhailov B. M., Kulikova G. V. *Fatsial'nyi analiz kor vyvetrivaniya* [Facial analysis of weathering crusts]. Leningrad, Nedra publ., 1977, 158 p. (In Russ.)
81. Nikitina A. P. *Drevnyaya kora vyvetrivaniya kristallicheskogo fundamenta Voronezhskoi anteklizy i ee boksitosnost'* [Ancient weathering crust of the crystalline basement of the Voronezh anticline and its bauxite content]. Moscow, Nauka publ., 1968, 159 p. (In Russ.)
82. Bushinskii G.I. O vyvetrivanii, promyvnom gidrolize i protochnom diagenoze [On weathering, washing hydrolysis and flow diagenesis]. *Litologiya i poleznye iskopaemye Lithology and Minerals*, 1977, no. 6, pp. 32–43. (In Russ.)
83. Violante A., Huang P. M. Influence of inorganic and organic ligands on the formation of aluminium hydroxides and oxyhydroxides. *Clays and Clay Mineral*, 1985, vol. 33, pp. 181–192.
84. Violante A., Violante P. Influence of pH, concentration, and chelating power of organic anions on the syntheses of aluminium hydroxides and oxyhydroxides. *Clays and Clay Mineral*, 1980, vol. 28, pp. 425–434.
85. Novakova A. A., Dolzhikova A. V., Novikov V. M., Boeva N. M., Zhegallo E. A. Sravnitel'noe issledovanie strukturno-morfologicheskikh osobennosti biogenykh i sintezirovannykh nanochastits getita [Comparative study of the structural and morphological features of biogenic and synthesized goethite nanoparticles]. *Kristallografiya – Crystallography*, 2017, vol. 62, no. 6, pp. 981–985. (In Russ.)
86. Toth T. A., Fritz S. J. An Fe-berthierine from a cretaceous laterite: Part I. Characterization. *Clays and Clay Minerals*, 1997, vol. 45, no. 4, pp. 564–579.
87. Maynard J. B. *Geochemistry of sedimentary are deposits*. New York; Heidelberg; Berlin. 1983. 202 p.
88. Bhattacharyya D.R. Origin of berthierine in ironstones. *Clays and Clay Minerals*, 1983, vol. 31, pp. 173–182.
89. Hornibrook E.R.C., Longstaffe F. J. Berthierine from the lower cretaceous clearwater formation, Alberta, Canada. *Clays and Clay Minerals*, 1996, vol. 44, pp. 1–21.
90. Velde B., Meunier A. *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Verlag – Berlin – Heidelberg, Springer, 2008. 406 p.
91. Sirotnin V. I., Buneev V. N. Paleolandshafty vizeiskogo karbonatnokolpeniya yugo-zapadnogo sklona Voronezhskoi anteklizy [Paleolandscapes of the Viséan carbonate accumulation of the southwestern slope of the Voronezh anticline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2007, no. 1, pp. 11–22. (In Russ.)
92. Naimark E. B. Kompantseva E. I., Komova A. V. Vzaimodeistvie anoksigennykh fototrofnnykh bakterii rhodopseudomonas sp. s kaolinitom [Interaction of anoxygenic phototrophic bacteria rhodopseudomonas sp. with kaolinite]. *Mikrobiologiya – Microbiology*, 2009, vol. 78, no. 6, pp. 786–795. (In Russ.)
93. Dobrovolskii V.V. *Geografiya i paleogeografiya kory vyvetrivaniya SSSR* [Geography and paleogeography of the weathering crust of the USSR.]. Moscow, 1969. 228 p. (In Russ.)
94. Savko, A.D., Dodatko A.D. *Kory vyvetrivaniya v geologicheskoi istorii Vostochno-Evropeskoj platform* [Weathering crusts in the geological history of the East European Platform]. Voronezh, VSU publ., 1991. 231 p. (In Russ.)
95. Itykov V. F. Raspredelenie polimorfnykh modifikatsii gidroksidov alyuminiya v allofan-gibbsitovykh porodakh Povolz'ya [Distribution of polymorphic modifications of aluminum hydroxides in allophan-gibbsite rocks of the Volga region]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and Minerals*, 2009, no. 4, pp. 374–383. (In Russ.)
96. Klekl' V. N., Nikitina A. P., Tal'ko Yu. K. Mineralogicheskieskie osobennosti boksitov [Mineralogical and technological features of bauxites]. *Kora vyvetrivaniya [Eathering crust]*, 1991, vol. 20, pp. 157–165. (In Russ.)
97. Mu N., Schulz H.-M., Fu Y., Schovsbo N. H., Wirth R., Rhede D., van Berk W. Berthierine formation in reservoir rocks from the Siri oilfield (Danish North Sea) as result of fluid-rock interactions: Part I. Characterization. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 65, pp. 302–311.
98. Savko A. D. *Istoricheskaya geologiya: uchebnoe posobie* [Historical geology: textbook]. Voronezh, Vsu publ., 2008, 391 p. (In Russ.)

Савко Аркадий Дмитриевич – д. г.-м. н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; E-mail: savko@geol.vsu.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2133-3317>
 Овчинникова Марина Юрьевна – к.г.-м.н., преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; E-mail: ovchinnikova@geol.vsu.ru; ORCID <https://orcid.org/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 <https://orcid.org/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 <https://orcid.org/0000-0002-9143-0051>

All authors have read and approved the final manuscript.