

УДК 552.24 + 553.3/.4 + 551.71/.72

О.М. Розен

Федер. гос. бюджет. учреждение науки
"Геологический институт (ГИН) РАН"
119017, г. Москва, Россия, Пыжевский пер., 7
E-mail: roseno@yandex.ru

АРХЕЙ – ПРОТЕРОЗОЙ – ВАЖНЫЙ РУБЕЖ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ (2,5 МЛРД ЛЕТ)

Обобщенно изложены особенности геологических процессов на рубеже архея и протерозоя. Показано, что фоновое осадконакопление (терригенные и карбонатные отложения) рассматриваемого отрезка времени в основном соответствует фанерозою. Осадочные бассейны того времени и мафические расслоенные плутоны, внедрившиеся в кору из поднимавшихся мантийных плюмов, только на этом возрастном рубеже обладают ураганным оруденением, которого не было ни до, ни после в геологической истории. Особняком стоит осадочная полосчатая железорудная формация. Максимальный объем поступления рудоносного флюида приходится на рубеж архей–протерозой — 2,5 млрд лет назад. В это время джеспилиты и их метаморфические эквиваленты толщи Хамерсли, Австралия, сформировали самое крупное месторождение железа в мире. После бурного развития, как раз на рассматриваемом рубеже, эта формация была менее распространена в протерозое и исчезла к началу фанерозоя. Таким образом, указанный рубеж характеризуется уникальными — не известными ни до, ни после — крупнейшими проявлениями металлического оруденения, а также прекращением железорудного осадконакопления в промышленных масштабах.

Ключевые слова: осадочный бассейн, расслоенный плутон, рудные месторождения, архей, протерозой.

Вступление. Рассмотрены особенности геологических процессов в связи с рубежом архея и протерозоя, сопоставлены особенности осадконакопления, магматизма и оруденения, предшествующие и последующие указанному рубежу, а также приуроченные к нему.

Объекты и методы. Исследование геологических процессов на рубеже архея и протерозоя основано на обобщении и анализе мировых данных.

Результаты и их обсуждение. К рассматриваемому рубежу образование коры достигло исторического максимума за период 3,0–2,5 млрд лет, т. е. практически за 1 млрд лет образовалось 36 % всей континентальной коры Земли [1] (рис. 1).

Во время аккреции, в процессе коллизии и сопровождающего метаморфизма, первичные сиалические микроконтиненты превращались в деформированные террейны, вместе образо-

вывавшие древние кратоны [10]. Коллизионные горные сооружения эродировали, на их месте возникали пенеплены, поверх которых накапливались осадочные бассейны. Кратоны периодически группировались в суперконтиненты, которые затем распадались, чтобы позднее вновь объединиться. Центральным суперконтинентом рассматриваемой эпохи был Кенорленд. Он возник в результате действия наиболее мощных в геологической истории Земли плюмовых процессов [3], сопровождаемых новообразованием континентальной коры и последующей аккрецией ее в суперконтинент, ~ 2,7 млрд лет назад. Этот возраст — интегральная оценка возрастного максимума указанных процессов, поскольку внедрение мафических плюмовых магм в форме расслоенных мафитовых плутонов начинается за ~0,5 млрд лет, а завершается спустя ~0,5 млрд лет после максимума плюмовых процессов.

Осадочные бассейны и расслоенные интрузии, сформировавшиеся в указанный период,

характеризовались уникальным рудообразованием, включая наиболее крупные в мире месторождения золота, урана, платиноидов, хромитов. Например, в конгломератах бассейна Витватерсранд (Южная Африка), развивавшегося 3,07–2,5 млрд лет назад, запасы золота и урана крупнейшие в мире. Накопление кластогенных горизонтов с золотым и урановым оруденением периодически повторялось в течение всего времени унаследованного погружения бассейна. В основание этого бассейна внедрился расслоенный плутон Бушвелд (2,1 млрд лет назад, на завершающей стадии развития плюмового эпизода, относимого к 2,5 млрд лет). В этом плутоне сформировались не имеющие аналогов по масштабу месторождения платиноидов и хромитов, а также значительные медно-никелевые и оловорудные месторождения. Второе место в мире по платиноидам и хромитам занимает Великая Дайка Зимбабве, Южная Африка (2,6 млрд лет, длина

550 км, ширина 4–12 км). Платиноиды обогащают отдельный уровень, а хромиты — серию горизонтов. Таким образом, по интенсивности процессов плюмового магматизма и рудообразования указанный отрезок геологической истории не имеет себе равных и оказывается переломным в истории Земли. Особая, глобальная значимость указанного рубежа наиболее отчетливо выражена в исчезновении полосчатой железорудной формации (ПЖФ, *BIF*) в постархейской геологической истории, хотя эта формация существовала изначально, с 4,28 млрд лет [9] (рис. 2).

С самого начала геологической истории, в частности в зеленокаменных поясах 3,8–3,2 млрд лет назад (обзор в [10]), спектр осадочных отложений формационно не отличается от островодужных толщ фанерозоя. Уже в то время присутствуют *фрагменты карбонатов* (в том числе строматолитовых) пассивных окраин, *эвапориты, пелиты и обломочные кварци-*

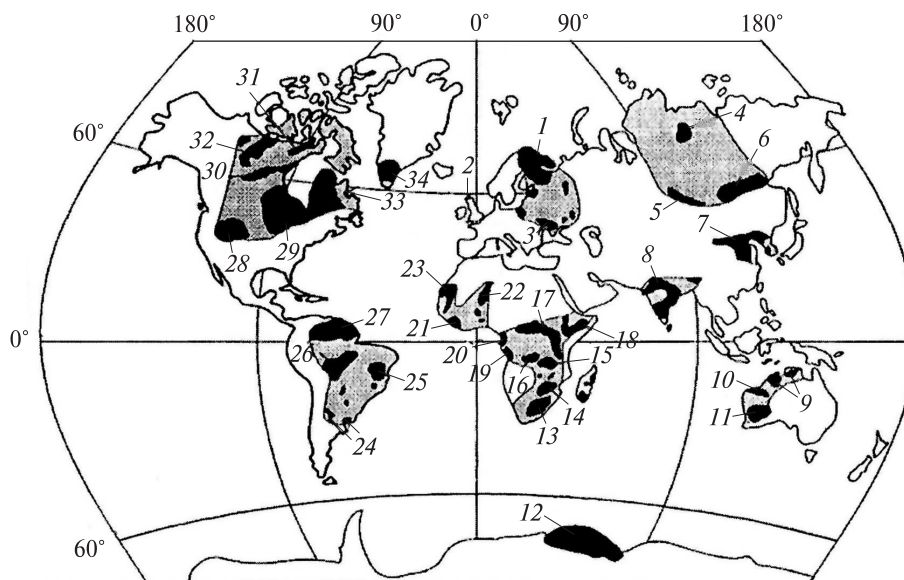


Рис. 1. Глобальное распространение пород архея, частично в ассоциации с протерозоем (черное — выходы на поверхность, серое — перекрыто чехлом) [8]: 1 — Балтийский щит; 2 — Шотландский щит; 3 — Украинский щит; 4 — Анабарский щит; 5 — Байкальский, Саянский, Енисейский складчатые пояса; 6 — Алданский щит; 7 — кратоны Сино-Корейский, Тарим и Янцзы; 8 — Индийский щит; 9 — комплексы Литчфилд, Рул-Джангл, Нанамбу; 10 — кратон Пилбара; 11 — кратон Йилгарн; 12 — комплекс Напьер; 13 —

кратон Каапваль; 14 — кратон Зимбабве; 15 — блок Замбия; 16 — кратон Касаи; 17 — Центрально-Африканский кратон; 18 — Эфиопский блок; 19 — кратон Чайлу; 20 — комплекс Камерун-Нтем; 21 — щит Мэн; 22 — щит Туа-рег; 23 — щит Регибат; 24 — массивы Рио-де-ла Плата, Луис-Алве; 25 — кратон Сан-Франциско; 26 — кратон Гуапоре; 27 — щит Гайяна; 28 — провинция Вайоминг; 29 — провинция Сьюпериор; 30 — группа Каминак; 31 — блок Комити-Бэй; 32 — провинция Слейв; 33 — щит Лабрадор; 34 — Гренландский щит

Fig. 1. Distribution of Archean provinces partly in association with Proterozoic [8] (the exposed Archean terranes are in black, and the areas underlain by Archean rocks are in grey): 1 — Baltic Shield; 2 — Scottish Shield; 3 — Ukrainian Shield; 4 — Anabar Shield; 5 — Baikal, Sayan and Yenisei fold belts; 6 — Aldan Shield; 7 — Sino-Korean, Tarim and Yangtze cratons; 8 — Indian Shield; 9 — Litchfield, Rul-Jungle and Nanambu complexes; 10 — Pilbara block; 11 — Yilgarn block; 12 — Napier complex; 13 — Kaapvaal craton; 14 — Zimbabwe craton; 15 — Zambian block; 16 — Kasai craton; 17 — Central Africa craton; 18 — Efiopian block; 19 — Chaillu craton; 20 — Cameroon-N'tem complex; 21 — Man Shield; 22 — Tuareg Shield; 23 — Reguibat Shield; 24 — Rio de la Plata and Luis-Alves massifs; 25 — San-Francisco craton; 26 — Guapore craton; 27 — Guiana Shield; 28 — Wyoming province; 29 — Superior province; 30 — Kaminak group; 31 — Committee-Bay block; 32 — Slave province; 33 — Labrador Shield; 34 — Greenland Shield

Рис. 2. Наиболее важные проявления полосчатой железорудной формации [6, 7]: 1–4 — вулканогенно-осадочный тип Алгома, 3,7–2,8 млрд лет (1 — Иматака, Венесуэла; 2 — конкско-белозерский комплекс, Украина; 3 — комплекс Бихар-Орисса, Индия; 4 — Либерийский щит, Западная Африка); 5–15 — седиментогенный тип Сьюперior (оз. Верхнее), 2,5–2,0 млрд лет (5 — бассейн Хамерсли, Австралия; 6 — Западный Трансвааль-Грикваленд, Южная Африка; 7 — Минас-Жераис, Бразилия; 8 — трог Лабрадор, Канада; 9 — Кривой Рог, Украина; 10 — Мидлбек-Рендж, Австралия; 11 — бассейн Наберру, Австралия; 12 — оз. Верхнее, США; 13 — Рапитан, Западная Канада; 14 — Урукум, Бразилия/Боливия; 15 — Малый Хинган, Россия). Цифрами обозначены места локализации полосчатой железорудной формации. Горизонтальные линии указывают разброс возрастных значений

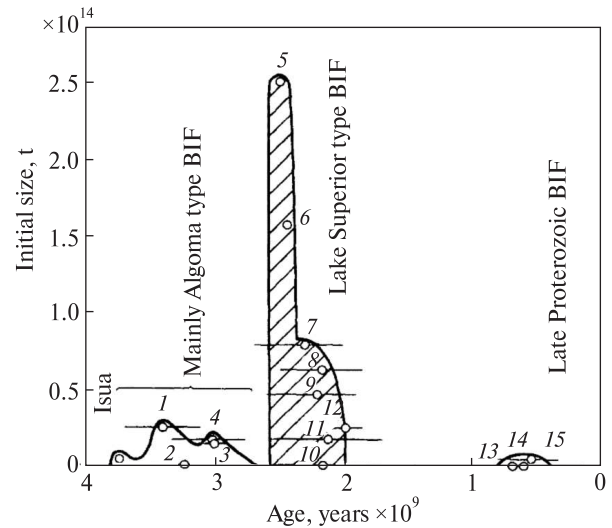


Fig. 2. The most important banded iron formations [6, 7]: 1–4 — volcanic-sedimentary Algoma type, 3.7–2.8 Ga (1 — Imataca complex, Venezuela; 2 — Konksko-Belozerskiy complex, Ukraine; 3 — Bihar-Orissa complex, India; 4 — Liberian Shield, West Africa); 5–15 — sedimentary Superior type (Lake Superior), 2.5–2.0 Ga (5 — Hamersley basin, Australia; 6 — Transvaal-Griqualand West; South Africa; 7 — Minas-Gerais, Brazil; 8 — Labrador trough, Canada; 9 — Krivoy Rog, Ukraine; 10 — Middleback Range, Australia; 11 — Naberru basin, Australia; 12 — Lake Superior, the USA; 13 — Rapitan, West Canada; 14 — Urucum, Brazil/Bolivia; 15 — Maly Khinghan-Uda, Russia). By numbers the places of localization of a strip structure iron formations are marked. Horizontal bars indicate time uncertainties

ты (мономиктовые кварцевые песчаники), присущие стабильным шельфам, также как и подчиненные синорогенные турбидиты, конгломераты и полимиктовые песчаники — главным образом граувакки, присущие глубоководным трогам [5]. На кровле древних кратонов осадочные отложения присутствуют в других количественных соотношениях, чем в зеленокаменных поясах, и соответствуют скорее обстановке платформенного типа. Уже 3,5 млрд лет назад в таких супракратонных осадочных бассейнах были достаточно широко проявлены шельфовые, кварц-арсенитовые ассоциации (обычно с карбонатами) и высокозрелые косослоистые мономиктовые кварцевые песчаники, а также вулканокластические ассоциации [4, 13]. Присутствие обломочных кварцитов маркирует снос с выветрелых пород зрелого пенеплена, что указывает на продолжительное существование изостатически уравновешенной континентальной коры. Главным фактором докембрийского карбонатонакопления в архее оказываются цианобактериальные маты, причем строматолитовые карбонатные платформы составляют заметную часть мелководного шельфа [12].

Полосчатая железорудная формация (ПЖФ, BIF) — специфическая ассоциация осадков, присущая главным образом раннему докембрию (дорифею). В своем максимальном прояв-

лении формация приурочена именно к рубежу архея и протерозоя, когда происходит гигантская вспышка железорудного осадконакопления [6, 7]. Формация появилась 4,28 млрд лет назад в незначительном объеме в зеленокаменном поясе Нувуагитук (Nuvvuagittuq), Канада, затем — 3,8 млрд лет — пояс Исуа, Гренландия, а после образования ряда залежей в зеленокаменных поясах (Зимбабве, Южная Африка; Пилбара, Западная Австралия и др.) максимальный объем был достигнут 2,5 млрд лет назад (бассейн Хамерсли, Австралия). Затем возник пик 1,9 млрд лет назад (бассейны Трог-Лабрадор, провинция Анимики, Канада) и последний — в неопротерозое. К началу фанерозоя ПЖФ сошла на нет и позднее не проявлялась (рис. 2). Эти отложения (собственно джеспилиты) состоят из чередования прослоев оксидов железа (гематита и магнетита, 50 мас. %) и кремния (50 мас. %), иногда в ассоциации с сидеритом и сульфидами. Редко присутствует обломочный материал. Отложения ПЖФ повсеместно характеризуются отчетливой положительной аномалией европия и отрицательной — церия, что соответствует водам Атлантики на глубине 100 м с примесью 0,1 % гидротермального флюида Восточно-Тихоокеанского хребта [11].

В типовых стратиграфических разрезах участвуют, снизу вверх: базальные конгломераты

с галькой гранитоидов и других пород сиалического основания, доломиты, кварциты, железистые аргиллиты, полосчатые железные руды, углеродистые сланцы и аргиллиты. Это наиболее распространенный тип Сьюперior (оз. Верхнее), более характерный для палеопротерозоя, когда железо предположительно поступало из рассеянных донных гидротермальных флюидов. В архейских разрезах ПЖФ характеризуется ассоциацией с вулканитами зеленокаменных поясов при поступлении железа из гидротерм вулканических аппаратов (тип Алгома). Железорудные бассейны формировались в интракратонной обстановке, на пассивных окраинах или в платформенных бассейнах в условиях повышенного уровня моря.

На мелководном шельфе формация накапливалась в результате подъема (апвеллинга) восстановленных донных вод в область окисления, где железо переходило в нерастворимую, окисленную форму и выпадало в осадок. В случае значительного выброса флюида в океан горячий гидротермальный раствор поднимался до уровня нейтральной плавуности, разносился океанскими течениями и мог без апвеллинга накапливаться на шельфе в зонах окисленных вод, континентальных окраинах и в других эпиконтинентальных областях. Суперплюмы 2,5 и 1,9 млрд лет назад вызвали активизацию мафитового вулканизма в океанских обстановках. В результате произошла интенсификация поступления гидротермальных растворов в океан. Одновременно поднялся уровень моря и распались суперконтиненты, что привело к образованию мелководных морских бассейнов на стабильных шельфах, благоприятных для отложения ПЖФ [2].

Максимальный объем выноса рудоносного флюида приходится на рубеж архей — протерозой, 2,5 млрд лет назад. В это время джеспилиты (включая метаморфические эквиваленты) толщи Хамерсли накапливались как на вулканогенно-осадочных отложениях Фортескью, так и непосредственно на гранит-зеленокаменном основании кратона Пилбара, Австралия. В современной структуре палеобассейн занимает 120 тыс. км² при длине 600, ширине 350 и мощности джеспилитового горизонта 2,5 км. Содержание железа в джеспилитах 25—40 %, запасы — сотни миллиардов тонн. Выделяются богатые руды трех разновидностей: 1 — массивные гематитовые, 2 —

гематитовые конгломераты, 3 — лимонитовые пизолиты. Содержание железа в них 64—67 %. Хамерсли — самое крупное месторождение железа в мире.

Выводы. Фоновое осадконакопление (терригенные и карбонатные отложения) на рубеже архей — протерозой в основном соответствует фанерозою. Только на этом возрастном рубеже осадочные бассейны и мафические расслоенные плутоны, внедрявшиеся в кору из поднимавшихся мантийных плюмов, обладают ураганным оруденением (платиноиды, хромиты и др.), которого не было ни до, ни после в геологической истории. Особое место в архее и раннем протерозое занимает интенсивное накопление полосчатых железных руд (джеспилитов и их метаморфических производных), которое сошло на нет уже к началу фанерозоя и в дальнейшей истории не обнаруживается. Источники железа не очевидны, однако если учесть дефицит железа в литосферных корнях (килях) древних кратонов, правмерно предположить, что таким источником были ранние вулканиты, претерпевшие процесс тектонического скупиванья с последующим погружением в мантию и формированием литосферного кила, обедненного железом. Как раз к рассматриваемому рубежу — концу архея, во время максимума осадочного железонанкопления, — завершаются процессы аккреции в основной массе докембрийских кратонов, которые вошли в суперконтинент Кенорленд.

Автор признателен д-ру геол.-минерал. наук В.С. Федоровскому за полезные обсуждения вопросов проявления деформаций в метаморфических комплексах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Condie K.C.* Episodic continental growth and supercontinents a mantle avalanche connection? // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1998. — **163**. — P. 97—108.
2. *Condie K.C.* Mantle plumes and their record in Earth history. — Cambridge : Cambr. Univ. Press, 2001. — 305 p.
3. *Condie K.C.* Earth as an Evolving Planetary System. — 2nd ed. — Amsterdam : Elsevier, 2011. — 574 p.
4. *Eriksson K.A., Donaldson J.A.* Basinal and shelf sedimentation in relation to the Archaean—Proterozoic boundary // *Precamb. Res.* — 1986. — **33**. — P. 103—121.
5. *Greenstone belts* / Eds M. de Wit, L.D. Ashwal. — 1997. — 809 p. — (Oxford Monographs on Geology and Geophysics ; Vol. 35).

6. Klein C. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin // *Amer. Miner.* — 2005. — **90**. — P. 1473—1499.
7. Klemm D.D. The formation of Paleoproterozoic banded iron formations and their associated Fe and Mn deposits, with reference to the Griqualand West deposits South Africa // *J. Afr. Earth Sci.* — 2000. — **20**, No 1. — P. 1—24.
8. Martin H. Archean grey gneisses and the genesis of continental crust Archean crustal evolution / Ed. K.C. Condie. — Amsterdam-Tokyo : Elsevier, 1994. — P. 205—260. — (Develop. in Precamb. Res. Geology Ser. ; Vol. 11).
9. O'Neil J., Carlson R.W., Francis D.C., Stevenson R.K. Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust // *Science.* — 2008. — **321**. — P. 1828—1831.
10. Rosen O.M. Stabilization and breakdown of Archean cratons: formation of sedimentary basins, mafic magmatism, and metallogenic productivity // *Geotectonics.* — 2011. — **45**, No 1. — P. 1—22.
11. Rosen O.M., Shchipansky A.A., Turkina O.M. Early Earth geodynamics: evolution and stability of geological processes (ophiolites, island arcs, cratons and sedimentary basins). — Moscow : Sci. world, 2008. — 184 p. — (Transact. GIN RAS ; v. 584).
12. Sergeev V.N., Semikhatov M.A., Fedonkin M.A. et al. Principal Stages in Evolution of Precambrian Organic World: Communication 1. Archean and Early Proterozoic // *Stratigraphy and Geol. Correlation.* — 2007. — **15**, No 2. — P. 25—46.
13. Thurston P.C., Chivers K.M. Secular variation in greenschist sequence development emphasizing Superior Province // *Precamb. Res.* — 1990. — **46**. — P. 21—58.

Поступила 24.03.2014

REFERENCES

1. Condie, K.C. (1998), *Earth and Planet Sci. Lett.*, Vol. 163, pp. 97-108.
2. Condie, K.C. (2001), *Mantle plumes and their record in Earth history*, Cambr. Univ. Press, Cambridge, 305 p.
3. Condie, K.C. (2011), *Earth as an Evolving Planetary System*, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, 574 p.
4. Eriksson, K.A. and Donaldson, J.A. (1986), *Precamb. Res.*, Vol. 33, pp. 103-121.
5. *Greenstone belts*, in Wit, M. and Ashwal, L.D. (eds.) (1997), *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, Vol. 35, 809 p.
6. Klein, C. (2005), *American Mineralogist*, Vol. 90, pp. 1473-1499.
7. Klemm, D.D. (2000), *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 20 No 1, pp. 1-24.
8. Martin, H. (1994), in Condie, K.C. (ed.), *Developments in Precambrian Research Geology Series*, Elsevier, Amsterdam-Tokyo, Vol. 11, pp. 205-260.
9. O'Neil, J., Carlson, R.W., Francis, D.C., Stevenson, R.K. (2008), *Science*, Vol. 321, pp. 1828-1831.

10. Rosen, O.M. (2011), *Geotectonics*, Vol. 45, No 1, pp. 1-22.
11. Rosen, O.M., Shchipansky, A.A. and Turkina, O.M. (2008), *Scientific world*, (Transact., GIN RAS, v. 584), Moscow, 184 p.
12. Sergeev, V.N., Semikhatov, M.A., Fedonkin, M.A., Veis, A.F. and Vorob'eva, N.G. (2007), *Stratigraphy and Geological Correlation*, Vol. 15 No 2, pp. 25-46.
13. Thurston, P.C. and Chivers, K.M. (1990), *Precamb. Res.*, Vol. 46, pp. 21-58.

Received 24.03.2014

O.M. Розен

Федер. держ. бюджет. установка науки
"Геологичний інститут (ГІН) РАН"
119017, Москва, Росія, Пижевський пров., 7
E-mail: roseno@yandex.ru

АРХЕЙ—ПРОТЕРОЗОЙ — ВАЖЛИВИЙ РУБІЖ В ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ (2,5 МЛРД РР.)

Розглянуто особливості геологічних процесів на рубежі архею та протерозою. Показано, що фонове осадконакопичення (теригенні та карбонатні відклади) цього відтинку часу переважно відповідає фанерозою. Тільки на цьому віковому рубежі осадові басейни і пліомові інтрузії мафітів містять надзвичайне зруденіння (платиноїди, хроміти та ін.), якого не було ні до, ні після в геологічній історії. В осадовій смугастій залізородній формації максимум зруденіння зосереджений у джеспілітах товщі Хамерслі, Австралія, 2,5 млрд рр. Пізніше ця формація скоротилася у протерозої та зникла до початку фанерозою. Джерела заліза не очевидні, проте якщо врахувати дефіцит заліза в літосферних коренях (кілях) стародавніх кратонів, правомірно припустити, що таким джерелом були ранні вулканіти, які зазнали тектонічного скупчення з подальшим зануренням у мантию і формуванням літосферного кіля, збідненого на залізо. На рубежі 2,5 млрд рр. осадові басейни, зокрема залізородні, також як і мафічні розшаровані плутони, містять унікальне зруденіння і саме до кінця архею, під час максимуму осадового залізонакопичення, завершуються процеси акресії в основній масі докембрійських кратонів, які увійшли до суперконтиненту Кенорленд.

Ключові слова: осадовий басейн, розшарований плутон, рудні родовища, архей, протерозой.

O.M. Rosen

Geological Institute (GIN) of RAS
7, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017
E-mail: roseno@yandex.ru

ARCHEAN—PROTEROZOIC — AN IMPORTANT BOUNDARY IN THE EARTH HISTORY (2.5 Ga)

The features of Archean and Proterozoic boundary processes have been considered, peculiarities of sedimentation, magmatism and mineralization at this threshold are compared, as well as confined to it. The study of the Archean and Proterozoic boundary processes are based on synthesis

and analysis of worldwide data. The turn of the Archean and Proterozoic process is outlined. The considered background deposition (clastic and carbonate deposits) corresponds to Phanerozoic. Only at that time, sedimentary basins and layered mafic plume plutons have hurricane mineralization (platinum, chromite, etc.). The largest iron deposit in the world is the jaspilite thickness Hamersley, Australia, 2.5 Ga. After rapid development, this sedimentary iron formation was reduced in its distribution in the Proterozoic and disappeared at the Phanerozoic beginning. Sources of iron are not obvious. Such may be the loss of iron in the ancient craton lithosphere roots (keels), when the early volcanics congested and sank into the lithospheric

mantle to form the keel which is known to be depleted with iron. Background sedimentation (clastic and carbonate deposits) at 2.5 Ga basically corresponds to the Phanerozoic one. Sedimentary basins in particular iron ore, as well as layered mafic plutons, have a uniquely high mineralization in the geological history, i. e., such mineralization was not observed either before or after this milestone. Just in time of the considered boundary — the end of the Archean, during the peak of the sedimentary iron ores — the process of accretion in Precambrian cratons bulk terminated that entered in the supercontinent Kenorland.

Keywords: sedimentary basin, layered pluton, ore deposits, Archean, Proterozoic.