

РГБ ОД

10 МАЯ 1993
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И ФИЗИКИ МИНЕРАЛОВ
ОТДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОГЕНИИ

На правах рукописи

КОРЖИЕВ Михаил Николаевич

ГЕОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ТОЛЩ
РАНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ БАССЕЙНОВ

Специальность 04.00.11 – геология, поиски и разведка
рудных и нерудных месторождений; металлогения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Киев – 1993

Работа выполнена в Институте геохимии и физики минералов
АН Украины

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Е.Б. Глевасский,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор В.М. Кравченко,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор Н.А. Плаксенко

Ведущая организация: Криворожский горнорудный институт
/г. Кривой Рог/

Защита диссертации состоится "2" июня 1993 года
в 14 часов на заседании специализированного совета Д 016.17.02
при Отделении металлогении института геохимии и физики минералов
АН Украины.

Адрес: 252680, Киев - 142, просп. Палладина, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
геохимии и физики минералов АН Украины

Автореферат разослан "14" апреля 1993 года

Ученый секретарь специализированного
совета, доктор геол.-мин. наук

В.П. Бухарев

В в е д е н и е

Значение раннедокембрийских комплексов пород в геологии как в практическом, так и в теоретическом аспектах трудно переоценить. Они занимают большую часть современной материковой коры, слагая не только щиты и основание древних платформ, но и присутствуя в виде переработанных реликтов во многих складчатых областях. К образованиям раннего докембрия приурочены крупнейшие в мире месторождения железа, золота, урана, платины, ванадия, хрома и многих других полезных ископаемых. Ранний докембрий по своей продолжительности занимает более половины всей геологической истории. Сама раннедокембрийские комплексы часто сильно переработаны. Поэтому, многие годы представления о раннедокембрийской истории нашей планеты не выходили за рамки самых общих предположений, логически вытекающих скорее из существующих космологических гипотез, чем из фактического геологического материала. Практические успехи, сделанные геологией в последние десятилетия в нескольких направлениях, таких как: детальные исследования, расчленение и типизация структурно-вещественных комплексов раннего докембрия; получение данных о составе и строении поверхности Луны и планет земной группы, закончивших свою активную тектоническую жизнь еще в архее; изучение состава и строения океанического сегмента земной коры и создание теоретических основ тектоники литосферных плит; и некоторых других, позволили вплотную подойти к решению проблемы рашифровки раннедокембрийской истории нашей планеты. Все больше появляется данных, что переломным моментом в ней была коренная структурная перестройка земной коры на границе архея и протерозоя. Именно к этому времени относится заложение таких своеобразных структур как крупные бассейны железнакопления. Геологические исследования и обобщение материалов по ним, с одной стороны, могут пролить свет на то, как происходила эта перестройка, а с другой - зафиксировать основные этапы эволюции океана и атмосферы, т.к. состав, строение и геохимические особенности толщ, выполняющих эти бассейны, являются чувствительными индикаторами тектонических движений и изменений среды.

Практической стороной изучения крупных раннепротерозойских бассейнов является то, что в них сосредоточено большинство мировых запасов железных руд. Феномен массового железнакопления в раннепротерозойское время давно привлекает внимание ученых и исследован в разных аспектах. К настоящему времени изучены состав и строение

железородных толщ нижнепротерозойского возраста в различных регионах, идет широкая дискуссия о причинах массового железнакопления в докембрии и его физико-химических условиях. Нет недостатка и в моделях накопления железисто-кремнистых формаций /физико-химических, геохимических, математических и др./, появившихся в последнее время и несколько отодвинувших на второй план геологические данные. Но, совершенно очевидно, что именно на этих данных следует проверять правомерность той или иной гипотезы.

Актуальность избранной темы определяется большой практической ценностью месторождений полезных ископаемых раннепротерозойской металлогенической эпохи: железа, никеля, меди, урана, платины, хрома и других. Бассейны раннего протерозоя вмещают большую часть мировых запасов железных руд, являющихся основой железорудной базы черной металлургии во многих промышленно развитых странах, в том числе в России и Украине.

Цель исследования - реконструировать геологические события и воссоздать геологическую обстановку массового железнакопления в раннем протерозое.

Фактический материал и методы исследования. Основой для выполнения работы послужил огромный фактический материал по областям развития раннепротерозойских железорудных толщ, приведенный во многочисленных зарубежных и отечественных монографических и периодических изданиях, а также результаты собственных исследований автора по районам развития раннего докембрия Восточно-Европейской платформы /преимущественно по Украинскому щиту, в меньшей степени - КМА, Южному Уралу и Балтийскому щиту/. В течение последних 15 лет автору удалось собрать большой фактический материал по Криворожскому, Правобережному и Кременчугскому районам Украинского щита, наряду с данными других исследователей, положенный в основу реконструкции геологической истории и условий накопления толщи пород криворожской серии. Основными методами, которыми автор пользовался в своих исследованиях, являются: общегеологические, петрографические, петрохимические, геохимические и методы стратиграфической корреляции и палеотектонических реконструкций. Геохимические исследования проведены на основе данных о содержаниях породообразующих компонентов и малых элементов в породах и изотопного состава серы сульфидов, полученных силикатным, плазменно-спектроскопическим, нейтронно-активационным, рентген-флуоресцентным, количественным спектральным и масспектрометрическим методами анализа.

Новизна и научная значимость. Показано возникновение раннепротерозойских бассейнов на определенном этапе эволюции раннедокембрийской литосферы как следствие коренной структурной перестройки континентальной земной коры. Реконструирована геологическая обстановка массового железнакопления в раннем протерозое.

Практическое значение работы. Зависимость типа и возраста бассейнов от размеров и длительности развития гранит-зеленокаменных областей, с которыми они пространственно связаны, позволяют осуществлять предварительную оценку докембрийских щитов и платформ на возможность обнаружения железорудных бассейнов определенного типа.

Защищаемые положения. 1. Раннепротерозойское железнакопление связано с определенным этапом эволюции архейских гранит-зеленокаменных областей, на рубеже архея и протерозоя испытавших кратонизацию и изостатическое выравнивание. Бассейны первой и второй половин раннего протерозоя связаны, соответственно, с древними и "молодыми" гранит-зеленокаменными областями и характеризуют два уровня железнакопления: первый - 2,5-2,3 млрд лет назад, а второй - 2,1-1,9 млрд лет назад. Эти бассейны отличаются структурным положением, внутренним строением, латеральным изменением толщ и типом железисто-кремнистых формаций. По своим масштабам первый уровень железнакопления превосходил второй в несколько раз.

2. Заложению большинства крупных бассейнов железнакопления первой половины раннего протерозоя предшествовал тектонический режим континентальных окраин индийского типа, приведший к формированию в пределах гранит-зеленокаменных областей рифтогенных структур /в дальнейшем, в той или иной мере, определивших строение первичных бассейнов/ и отразившийся на геохимических особенностях вулканогенных пород, накопившихся в этих структурах.

3. Массовое железнакопление в раннем протерозое происходило в средних широтах, в климатическом поясе, в котором господствовали аридные условия, определившие минеральный и химический состав терригенных пород и особенности распределения в них элементов-примесей. Условия для него создались при климатических изменениях, происходивших на фоне структурных перестроек континентального сегмента земной коры и вызвавших ряд взаимосвязанных явлений, зафиксированных в геохимических особенностях пород.

Апробация работы. Отдельные аспекты работы докладывались на 1У петрографическом совещании в г. Петрозаводске в 1987 году и

Ш Всесоюзной структурной школе в г. Киеве в 1990 году, а также были представлены в виде тезисов докладов на XI металлогеническом совещании в г. Киеве в 1990 году, IX палеовулканологическом симпозиуме в г. Иркутске в 1992 году и других совещаниях различного ранга.

Построение работы. Работа имеет объем 258 маш. стр., включая 4 табл., 47 рис., список литературы из 182 наим., и состоит из пяти глав, введения и заключения. Первая глава общая и рассматривает распространенность железорудных толщ и структурную неоднородность докембрия, вторая - содержит анализ данных по возрасту, составу, строению, пространственному положению железорудных толщ и структуре первичных бассейнов и ее эволюции, третья - посвящена реконструкции условий накопления железорудных толщ на основе геохимических данных по Криворожскому бассейну, с учетом данных по другим бассейнам, четвертая - типам железисто-кремнистых формаций и связанным с ними рудам, пятая - воссоздает геологическую обстановку массового железнакопления, преимущественно на основе выводов, полученных в предыдущих главах.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 40 печатных работ. Он является соавтором пяти книг монографической серии "Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР", в том числе последней из них, содержащей сравнительную характеристику железисто-кремнистых формаций докембрия континентов.

Автор глубоко признателен академику АН Украины Я.Н.Белевцеву, в свое время определившему направление его исследований, за поддержку и научные консультации. Автор благодарен академику АН Украины Н.П.Щербаку, докторам геол.-мин. наук Е.Б.Глевасскому и К.Е.Есипчуку, ознакомившимся с рукописью, за ценные практические советы и замечания, которые учтены в работе, кандидату геол.-мин. наук Д.А.Кулику за предоставленную для исследования коллекцию сланцев саксаганской свиты криворожской серии, профессору К.Чену и доктору Г.С.Шао из Пекинского университета за выполненные по пробам автора определения содержания редкоземельных и других элементов, а также всем научным сотрудникам, принимавшим участие в обсуждении работы.

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТЫХ ФОРМАЦИЙ ДОКЕМБРИЯ

Железисто-кремнистые породы являются неременным членом большинства структурно-вещественных комплексов докембрия. Но распространены они в них крайне неравномерно. Это касается как объемов железисто-кремнистых пород в комплексах различного возраста, так и пространственного положения железорудных бассейнов. Не смотря на очень сходный облик пород разновозрастных железисто-кремнистых формаций, обусловленный общностью их генезиса, существенно отличались геоструктурные условия их формирования, наряду с другими геологическими факторами и эволюционным изменением атмосферы и гидросферы Земли обусловившие разные масштабы железорудного осадконакопления в геологической истории докембрия.

Железисто-кремнистые образования распространены в докембрии всех континентов. Их возрастной диапазон очень широк: от наиболее древних на Земле пород с возрастом 3,7-3,8 млд лет до пород верхнего протерозоя и фанерозоя. Различны и масштабы их проявления: от мелких линз и прослоев мощностью первые метры в осадочно-вулканогенных комплексах до самостоятельных толщ более чем километровой мощности, непрерывно прослеживающихся на сотни километров по простиранию. Оценки исследователей первоначальных размеров железисто-кремнистых формаций различного возраста однозначно свидетельствуют о том, что подавляющие объемы железисто-кремнистых пород /около 80 %/ накопились в короткий интервал геологического времени 2,5-2,0 млд лет назад в раннем протерозое. Основные объемы раннепротерозойских железисто-кремнистых формаций сосредоточены в нескольких железорудных бассейнах, относящихся к разряду крупных и очень крупных месторождений. Это - Лабрадорский трог и бассейн Анимики /Северная Америка/, бассейны Минас-Жерайс /Южная Америка/, Трансваальский /Африка/, Хамерсли и Набберу/Австралия/, Криворожский /Украина/, Курской магнитной аномалии /Россия/.

Феномен массового железнакопления в раннем протерозое известен давно. Большинство исследователей связывают его с качественным изменением состава гидросферы и атмосферы на границе архея и протерозоя и появлением свободного кислорода. Хотя, эти изменения, скорее всего, сами по себе явились следствием продолжавшейся дифференциации Земли на оболочки.

При всем разнообразии раннедокембрийских структурно-вещественных комплексов, их детальное изучение в последние десятилетия поз-

волило закартировать участки земной коры, отличающиеся составом и соотношением слагающих пород, степенью их тектонической переработки и проявления процессов регионального метаморфизма и гранитизации. Существенные различия в составе пород и геологической истории их формирования позволяют выделить среди них: гранит-зеленокаменные области, области, сложенные глубокометаморфизованными комплексами, и кратонные бассейны. Наиболее важную роль, как в размещении архейских железисто-кремнистых формаций, так и в заложении в последующее время раннепротерозойских кратонных бассейнов, вмещающих большинство запасов железных руд, играли гранит-зеленокаменные области. Но, железорудные формации встречаются и в глубокометаморфизованных комплексах раннего докембрия.

Актуальными и спорными в докембрийской геологии являются проблемы взаимоотношения гранит-зеленокаменных и глубокометаморфизованных областей и появления в определенный период геологической истории кратонных бассейнов.

Развитие большинства областей, сложенных в настоящее время глубокометаморфизованными комплексами пород, как считают многие исследователи, происходило параллельно с развитием гранит-зеленокаменных областей. Но, изотопные датировки возраста пород глубокометаморфизованных областей часто дают более древние цифры, чем датировки пород гранит-зеленокаменных областей. Кроме того, в последние нередко устанавливаются реликты, а иногда целые блоки, более древних глубокометаморфизованных пород. Это позволяет утверждать, что гранит-зеленокаменные области, все-таки, являются относительно более молодыми, заложившимися на более древнем гранулитогнейсовом основании. Обособление их как геологических структур связано с накоплением мощных вулканогенных толщ и прошедшей сразу после этого реомобилизацией гранулитогнейсового основания и подъемом гранито-гнейсовых куполов. Такая мощная переработка коры стерла особенности исходных пород. Поэтому, в большинстве случаев, породы гранит-зеленокаменных областей являются моноциклическими образованиями, в отличие от пород глубокометаморфизованных областей, в которых обычно в разной степени зафиксированы предыдущие этапы геологического развития.

В глубокометаморфизованных областях супракрустальные толщи нередко сложены типично платформенными ассоциациями метаосадочных пород небольшой мощности. Это является парадоксом, т.к. в рамках

традиционных представлений платформенный режим исключает проявление регионального высокотемпературного метаморфизма. Объяснение этому нужно искать в особенностях строения и развития континентального сегмента земной коры в архее.

Исследователи, пытающиеся восстановить раннюю геологическую историю с позиций современных тектонических представлений, допускают существование в раннем докембрии двух сегментов земной коры: континентального и океанического. Фрагментами первого сложены большие площади в пределах докембрийских щитов и основания древних платформ, а последний не сохранился в силу своей мобильности. Полагают, что континентальный сегмент земной коры представлял собой единый суперконтинент на протяжении всего архея. Он характеризовался относительно спокойным стилем тектоники, который определялся сочетанием изометричных гранит-зеленокаменных областей, представлявших собой эвгеосинклинальные бассейны, и платформенных областей, в пределах которых накалывались мелководные карбонатно-терригенные толщи, значительно меньшей мощности, чем осадочно-вулканогенные толщи зеленокаменных поясов. Несомненно, что на протяжении всего архея единый суперконтинент несколько раз испытывал тектонические перестройки, сопровождавшиеся его взламыванием, перемещением отдельных блоков относительно друг друга, складчатостью и глубоким метаморфизмом пород. Вспышки тектонической активности были относительно кратковременными, и платформенный режим довольно быстро восстанавливался снова. Важно также отметить, что долгое время магматическая и тектоническая активность в пределах континентального сегмента сосредотачивалась, преимущественно, в гранит-зеленокаменных областях, за исключением периодов крупных тектонических перестроек, что определяло его общую жесткую структуру.

С эволюцией гранит-зеленокаменных областей связана коренная структурная перестройка континентального сегмента земной коры в докембрии. Активная магматическая деятельность в гранит-зеленокаменных областях обусловила их перерождение. В отличие от раннеархейского времени, когда эти области были подвижными геосинклинальными, в конце архея они превратились в консолидированные /кратонизированные/ стабильные блоки. Именно кратонизацией большей части континентального сегмента земной коры знаменуется условная временная граница между археем и протерозоем. Начал формироваться новый структурный план континентальной земной коры - древние кратоны, окруженные подвижными поясами. С кратонизацией и дальнейшим изостатическим вы-

равниванием гранит-зеленокаменных областей связано заложение в их пределах или обрамлении обширных кратонных бассейнов раннепротерозойского железнакопления. Структурная перестройка зафиксирована резким изменением геохимических особенностей осадочных пород этих бассейнов, по сравнению с их архейскими аналогами /С.Р.Тейлор, С.М.Мак-Леннан, 1988/.

ГЕОЛОГИЯ КРУПНЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ БАССЕЙНОВ

К действительно крупным железорудным бассейнам на нашей планете можно отнести только восемь бассейнов, перечисленные, в предыдущем разделе. Несколько уступает им по размерам бассейн Сингхбум в Индии. Сопоставление их формы и размеров показывает, что это структуры одного порядка, достигающие многие сотни километров в поперечнике /до 800-1000 км/.

Л а б р а д о р с к и й т р о г - это сохранившаяся часть Лабрадорской геосинклинали, пересекающая Лабрадорский полуостров в Северной Америке в северо-западном направлении и протягивающаяся на расстояние более 1200 км при ширине до 200 км. Обычно его разделяют на три сегмента: Северный, Центральный и Южный. Последний находится в пределах провинции Гренвилл и сложен глубокометаморфизованными образованиями. Трог выполнен нижнепротерозойскими породами надгруппы Каниапско.

Б а с с е й н А н и м и к и в Северной Америке включает в себя раннепротерозойские образования железорудного района озера Верхнего. Это крупный субширотный синклинорий, примыкающий к архейскому блоку Сьюпириор с юга. Он имеет овальную форму с большой осью восточного направления около 700 км и малой осью около 400 км. Бассейн Анимики сложен образованиями одноименной надгруппы. Разрезы надгруппы Анимики представлены, преимущественно, тремя группами /снизу вверх/: Чоколей, Меномини и Барага. Венчает разрез надгруппы группа Пайнт-Ривер, сохранившаяся только в ядрах глубоких синклиналей на юге бассейна.

Б а с с е й н М и н а с - Ж е р а й с в Южной Америке представлен останцами раннепротерозойских толщ в полях гранитоидов в юго-восточном обрамлении кратона Сан-Франсиску, наиболее крупным из которых является Куадрелатеро Ферриферо, сложенный породами серии Минас, залегающими с угловым несогласием на архейских образованиях серии Риу-дас-Вельяс.

Трансваальский бассейн в Южной Африке сложен слабоскладчатыми толщами нижнепротерозойского возраста, распространёнными в западной и северной частях Каапваальского кратона и залегающими на архейском гранит-зеленокаменном основании. Бассейн имеет форму деформированного эллипса с большой осью, изогнутой на северо-запад, длиной около 1000 км и малой осью около 450 км. Образования Трансваальской системы встречены в двух районах: Северной Капской провинции и Трансваале. Их стратиграфическое расчленение в этих районах различно.

Бассейн Хамерсли в Западной Австралии имеет овальную форму, вытянутую на северо-запад, и размеры по длинной оси около 500 км и по короткой около 250 км. Сложен бассейн вулканогенно-осадочной толщей надгрупп Маунт-Брос и Уайлу, залегающей с угловым несогласием на архейских породах блока Пилбара, эродированной на севере и перекрытой более молодыми породами на юге, востоке и западе.

Бассейн Набберу - второй по величине железорудный бассейн в Западной Австралии. Он расположен на северном крае архейского блока Йилгарн и разделяется на три суббассейна: Педбери, Гленгери и Ирахиди. Выполнены эти суббассейны осадками одноимённых с ними групп, объединённых в надгруппу Набберу.

Бассейн Сингхбум в Индии расположен на границе штатов Ориса и Бихар и сложен образованиями Железорудной надгруппы, залегающей на краях архейского батолита Сингхбум. Батолит прорывает более древнюю толщу пород группы Олд Метаморфик. Железорудная надгруппа состоит из четырёх групп /снизу вверх/: Горумахисани, Дханжори, Ноамунди и Колхан.

Криворожский бассейн на Восточно-Европейской платформе расположен в пределах Украинского щита. Традиционно под этим названием подразумевают только Криворожскую структуру - узкий субмеридиальный синклиниорий протяжённостью около 75 км. Но, породы криворожской серии встречаются и в ряде мелких структур, протягиваясь узкой полосой до Кременчугского синклинория на северном склоне Украинского щита. Кроме того, аналоги пород криворожской серии распространены в Правобережном железорудном районе, где они глубокометаморфизованы. Все эти районы распространения пород криворожской серии и ее аналогов и относятся к Криворожскому бассейну - единой области седиментации в раннепротерозойское время, в которой накапливались железисто-кремнистые осадки.

Бассейн Курской магнитной аномалии /КМА/ на Воронежском кристаллическом массиве Восточно-Европейской платформы представляет собой область распространения нижнепротерозойских железисто-кремнистых пород, вытянутую с юго-востока на северо-запад более чем на 500 км при ширине 200-250 км. Расположен он в пределах одноименной с ним гранит-зеленокаменной области и первоначально, по-видимому, занимал большую ее часть. Раннепротерозойские толщи курской и осколькой серий, которыми сложен бассейн, распространены, преимущественно, в двух складчатых синклинирных зонах: Михайловско-Белгородской и Орловско-Россошанской, разделенных Курско-Корочанской антиклинорной зоной. Каждая из зон сложена рядом вытянутых в цепочки синклиналиных структур.

Пространственно-временные закономерности распространения и строения толщ

В раннедокембрийской истории Земли наблюдается несколько стратиграфических уровней железнакопления. В архее их, по крайней мере, пять, соответствующих основным периодам накопления толщ зеленокаменных поясов: древнее 3700 млн лет - железистые кварциты комплекса Исуа в Гренландии, 3300 млн лет назад - железисто-кремнистые породы зеленокаменного пояса Барбертон в Южной Африке, 3100 млн лет назад - железисто-кремнистые породы конкской свиты конкско-верховцевской серии Украинского щита, 2900 млн лет назад - железисто-кремнистые породы белозерской свиты этой же серии, 2750 млн лет назад - железисто-кремнистые породы зеленокаменных поясов Канадского щита. До начала восьмидесятых годов многими исследователями предполагалось, что накопление раннепротерозойских железисто-кремнистых формаций происходило приблизительно одновременно в относительно узком промежутке времени где-то около 2,0 млрд лет назад. В последнее время появились общегеологические и геохронологические данные о наличии по крайней мере двух хорошо выраженных уровней в раннепротерозойской эпохе железнакопления /П.Клауд, 1987/. Проведенный автором анализ геохронологических данных позволяет утверждать, что в первой половине раннего протерозоя /2,5-2,3 млрд лет назад/ накопились полосчатые железисто-кремнистые и железисто-кремнисто-доломитовые формации таких крупных бассейнов как Хамерсли, Трансваальского, Минас-Жерайс, Криворожского и КМА, а во второй половине /2,1-1,9 млрд лет назад/ - железисто-кремнисто-сланцевые гранулярные и оолитовые формации бассейна Анимики, Лабрадорского трога

и бассейна Набберу.

Масштабы железнакопления в первой и во второй половинах раннего протерозоя были разные. Так, для каждого из отдельных железорудных бассейнов первой половины раннего протерозоя первоначальный тоннаж оценивается цифрами $\approx 10^{14}$ тонн железа, а для каждого из бассейнов второй половины раннего протерозоя /за исключением Лабрадоского трога/ - $\approx 10^{13}$ тонн железа и менее /Г.Л.Джеймс, 1983/. Это позволяет сделать вывод, что переломному моменту геохимической эволюции соответствует железнакопление в первой половине раннего протерозоя.

Анализ расположения раннепротерозойских железорудных бассейнов относительно архейских структур земной коры однозначно выявляет их пространственную связь с гранит-зеленокаменными областями. В зависимости от пространственного положения относительно этих областей можно выделить интракратонные, интра-перикратонные и перикратонные их типы. Хотя, само по себе это разделение и несколько условно. Устанавливается связь между типом бассейна и размером гранит-зеленокаменной области, в пределах или в обрамлении которой он расположен /рис. 1/.

Интракратонные бассейны расположены обычно в пределах небольших гранит-зеленокаменных областей с длительной историей геологического развития. Такой областью является блок Пилбара в Западной Австралии, площадь которого, учитывая его продолжение под нижнепротерозойскими образованиями, составляет около $2 \cdot 10^5$ км². Меньшие /около $0,7 \cdot 10^5$ км²/ размеры имеет Среднеприднепровский блок Украинского щита. Относительно небольшие размеры, сопоставимые с размерами блоков Пилбара и Среднеприднепровского, можно предполагать для гранит-зеленокаменной области КМА /площадь около $1,2 \cdot 10^5$ км²/, границы которой, на данной стадии изученности Воронежского кристаллического массива, довольно условны. Железорудные толщи бассейнов Хаммерсли, Криворожского и КМА распространены в краевых частях этих областей, но никогда не выходят за их пределы.

Интра-перикратонные бассейны расположены в краевых частях и, частично, в обрамлении средних по размерам долгоживущих гранит-зеленокаменных областей. К таким областям относятся Каапваальский кратон в Южной Африке и кратон Сан-Франсиску в Южной Америке, имеющие площадь $5 \cdot 10^5$ км² и $6,3 \cdot 10^5$ км², соответственно. Пространственно с этими областями связаны бассейны Трансваальский и Минас-Жерайс.

Перикратонные бассейны расположены в обрамлении крупных гранит-

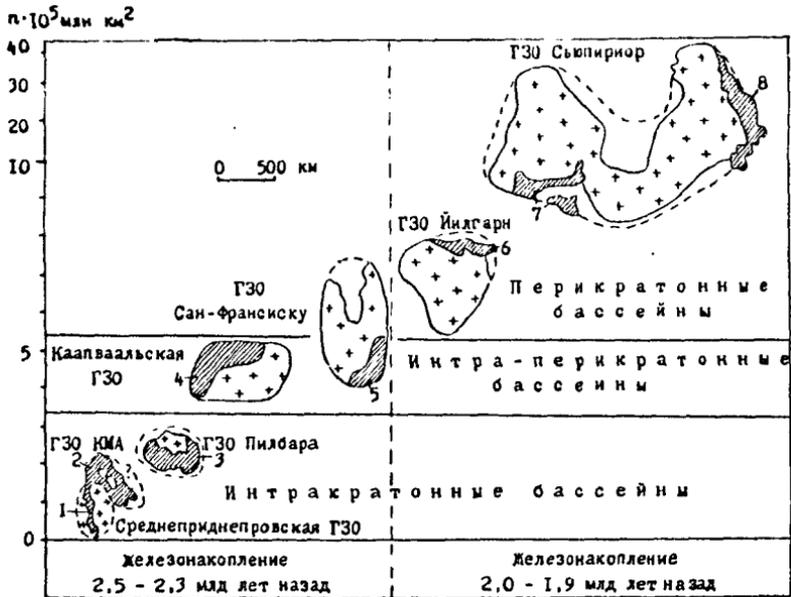


Рис. 1. Зависимость типа бассейна от размеров гранит-зеленокаменных областей /ГЗО/

зеленокаменных областей, формирование которых, преимущественно, было связано с широким проявлением наиболее позднего этапа архейского вулканизма в зеленокаменных поясах. Это - гранит-зеленокаменная провинция Сьюпириор на Канадском щите, имеющая размеры около $2,6 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, и блок Индгарн в Западной Австралии размером около $6,5 \cdot 10^5 \text{ км}^2$. В обрамлении провинции Сьюпириор расположены бассейн Анимики и Лабрадорский трог, а блока Индгарн - бассейн Набберу. Перикратонные бассейны характерны для второй половины раннего протерозоя, а распространенные в них железисто-кремнистые породы представлены разновидностями с гранулами и оолитами.

Состав толщ, вмещающих в раннепротерозойских интракратонных бассейнах железисто-кремнистые породы, преимущественно, терригенно-осадочный. Обычно они представляют собой трансгрессивный цикл, начинающийся с грубообломочных терригенных пород и кончающийся хемо-

генно-осадочными железисто-кремнистыми образованиями. В Криворожском бассейне основание этого цикла представлено конгломератами и песчаниками скелеватской свиты криворожской серии, которые сменяются вверх по разрезу филлитовидными сланцами, постепенно /через переслаивание/ переходящими в железисто-кремнистые породы саксаганской свиты. Подобная картина наблюдается и в бассейне ЮМА. Здесь терригенные породы стойленской свиты курской серии, содержащей в нижней части конгломераты, постепенно, через более мелкозернистые разновидности, сменяются вверх по разрезу железисто-кремнистыми породами коробковской свиты курской серии. В бассейне Хамерсли эта закономерность проявлена не столь четко. Железисто-кремнистые породы большой мощности группы Хамерсли согласно перекрывает осадочно-вулканогенную толщу более древней группы Фортескью, верхние части которой сложены терригенными породами, содержащими железисто-кремнистые образования формации Джириних.

Породы, непосредственно переслаивающиеся с железисто-кремнистыми образованиями в раннепротерозойских бассейнах интракратонного типа, представлены сланцами. В Криворожском бассейне - это кварц-серицитовые, хлорит-карбонатные, амфибол-хлоритовые, графитит-кварц-серицит-биотитовые и другие сланцы, в бассейне ЮМА - кварц-серицит-биотитовые и хлорит-биотитовые филлитовидные сланцы, в Хамерсли - очень тонкозернистые слабослоистые черные сланцы с карбонатом и пиритом и темно-серые тонкослоистые сланцы, нередко содержащие кремнистые прослои. В нижней части разреза группы Хамерсли встречены карбонатные породы /доломиты Виттенум/, но преобладающей разновидностью пород, переслаивающихся с железисто-кремнистыми образованиями этой группы, являются сланцы. Не смотря на преимущественно терригенно-осадочный характер вмещающих пород в бассейнах данного типа, накопление железисто-кремнистых осадков нередко происходило в них на фоне вулканизма. В Криворожском бассейне присутствуют только следы вулканической деятельности в виде послойно распределенных в железистых породах стильпомелана и альбита. В подстилающих железорудную саксаганскую свиту терригенных породах скелеватской свиты выделяется горизонт тальковых сланцев - измененных ультраосновных вулкаников. В бассейне Хамерсли среди сланцев встречаются прослои вулканического пепла, а в верхней части толщ железистых пород распространены кислые вулканы и их туфы.

Для толщ железисто-кремнистых пород интракратонных бассейнов характерно многопластовое строение. В Криворожском бассейне насы-

тывается до семи, в КМА - до трех, в Хамерсли - пять железистых горизонтов. Характерной чертой этих горизонтов является аутигенно-минералогическая зональность, выражающаяся в закономерной смене в их разрезах от краев к центру магнетит-карбонат-силикатных разновидностей железисто-кремнистых пород магнетитовыми и магнетит-гематитовыми, что отражает изменение фациальных условий накопления исходных осадков.

Железорудные толщи бассейнов переходного между интракратонными и перикратонными типа накапливались как во внутренних частях кратонов, так и их обрамлении. К ним можно отнести раннепротерозойские толщи Трансваальского бассейна на Каапваальском кратоне в Южной Африке. Состав толщи, подстилающей основные железорудные формации в этом бассейне, преимущественно, карбонатный. Сформировалась она в результате трансгрессии, начавшейся с отложения кварцитов и аргиллитов формаций Врейбург и Блэк Риф. После этого накопились мощные хемогенно-биогенные толщи известняков и доломитов групп Малмани и Кемпбеллренд. По направлению от платформы к глубоководному бассейну на западе эти толщи выклиниваются и переходят в доломиты кластической структуры, содержащие прослойки полосчатых анкеритокремнистых сланцев. Переход карбонатных пород в вышележащую толщу железисто-кремнистых пород постепенный через зону переслаивания. Мощность толщи железисто-кремнистых пород наиболее изученной формации Куруман изменяется от 135 м в платформенной части до 750 м в бассейновой. Вместе с подстилающими породами железорудная толща представляет собой трансгрессивно-регрессивный осадочный цикл. Породы, переслаивающиеся с железисто-кремнистыми образованиями формации Куруман представлены обычно анкеритокремнистыми и углистоглинистыми сланцами, часто встречаются стильномелановые сланцы - измененные вулканические пеплы. Сами железисто-кремнистые породы представлены силикатно- и карбонатно-магнетитовыми и магнетит-гематитовыми разновидностями. Для толщи железистых пород в платформенной части характерно однопластовое, а в бассейновой - многопластовое строение /Н.Дж.Бейкес, 1983/.

Наиболее общие закономерности состава и латеральной изменчивости толщ перикратонных бассейнов отмечались многими исследователями. В участках, где они непосредственно налегают на породы кратона, залегание их часто ненарушенное, складчатость слабая, они относительно маломощны, в них отсутствуют несогласия, нет вулканитов, породы практически не метаморфизованы. С удалением от кратона

мощность толщ, их метаморфизм и складчатость возрастают, увеличивается полнота разрезов, появляются многочисленные несогласия, толщи нередко приобретают вулканогенный состав.

Состав пород, вмещающих железисто-кремнистые образования, в бассейнах перикратонного типа, преимущественно, терригенный, хотя в некоторых из них существенную долю в разрезах занимают карбонатные породы. Группа Анимики одноименного с ней бассейна представляет собой простой трансгрессивный осадочный цикл, начинающийся с хорошо сортированных кластических пород, переходящих вверх по разрезу в железисто-кремнистые породы, и заканчивающийся песчано-глинистой толщей глубоководного бассейна с плохой циркуляцией. В Лабрадорском тропе и бассейне Набберу в подрудной и надрудной частях железорудных толщ присутствуют карбонатные породы. Наиболее примечательной отличительной чертой состава толщ раннепротерозойских перикратонных бассейнов является гранулярный характер железисто-кремнистых пород, не характерный для более древних железисто-кремнистых образований, свидетельствующий о мелководных условиях их формирования. Накопление железисто-кремнистых осадков перикратонных бассейнов нередко происходило на фоне вулканизма. Во внутренних частях бассейна Анимики, в районе Айрон Ривер - Кристал Фолз, они, например, непосредственно переслаиваются с вулканитами, а в частях, примыкающих к кратону, - в них присутствует пирокластический материал. Для толщ железистых пород перикратонных бассейнов обычно характерно одноплантовое строение, хотя в вулканогенных толщах внутренних частей бассейна Анимики отмечается несколько железистых горизонтов на разных стратиграфических уровнях.

Отмеченные особенности состава и строения железорудных толщ раннепротерозойских кратонных бассейнов различных типов относятся к основным продуктивным толщам. Но, в одних и тех же бассейнах, стратиграфически выше или ниже, могут встречаться железисто-кремнистые породы, характерные для других типов бассейнов.

Структура первичных бассейнов и ее эволюция

Строение раннепротерозойских бассейнов железнакопления во многом зависело от размеров гранит-зеленокаменных областей, с которыми они связаны, и степени консолидации земной коры в последних. Первоначальные условия заложения и первичная структура бассейнов первой половины раннего протерозоя, относящихся к интракратонному и интра-перикратонному типам, и второй половины раннего протерозоя,

являющихся перикратонными, были различны.

Мощность толщ интракратонных бассейнов определялась, преимущественно, неоднородностью еще не столь жесткого архейского основания. Над пониженными в рельефе зеленокаменными поясами накапливались более мощные толщи, а над гранитоидными куполами - менее мощные. Бассейны закладывались в пределах самих гранит-зеленокаменных областей и представляли собой геосинклинальные прогибы. Это, фактически, являлось продолжением развития этих областей.

Интра-перикратонные бассейны закладывались на уже консолидированных гранит-зеленокаменных областях, фактически представлявших собой кратоны. Неоднородность архейского основания оказывала какое-то влияние только в первоначальные моменты накопления толщ. В пределах кратона формировались типично платформенные толщи, переходящие на его крае в мощные толщи геосинклинальных прогибов.

Перикратонные бассейны закладывались в переходной зоне от крупных, уже полностью консолидированных, гранит-зеленокаменных областей, где господствовали платформенные условия, к океану. Это шельфовые бассейны. В них обычно выделяются миеосинклинальный и эвгеосинклинальный прогибы, разделенные поднятием. Мощность толщ и полнота их разрезов увеличиваются по направлению от кратона.

Сопоставляя материал по расположеную раннепротерозойских толщ по отношению к поверхности архейских кратонизированных гранит-зеленокаменных областей, на которых они залегают, можно прийти к выводу, что в геологической истории тела этих областей испытывали наклоны, и их поверхности периодически выводились из горизонтального состояния. Объяснение факта наклонов тел кратонизированных гранит-зеленокаменных областей в момент накопления раннепротерозойских толщ нужно искать не столько в тектоническом воздействии на них окружающей рамы, сколько в затухающей тектонической и магматической активности в пределах самих этих областей, а также в изостатическом подъеме отдельных их частей в этот период геологической истории, связанном с наращиванием в них мощности земной коры в позднеархейское время.

В ходе геологической истории структура первичных бассейнов раннепротерозойского железнакопления претерпела существенные изменения. В одних случаях /бассейны Хамерсли, Трансваальский/ она во многом сохранилась, в других /бассейны Минас-Жерайс, Криворожский, КМА/ - от нее остались только отдельные фрагменты в виде расбросанных разномасштабных синклиновых структур в полях реоморфизованных

архейских гранитоидов.

Интенсивность проявления и характер тектоники, выраженный в преобладании тех или иных структурных форм, в раннепротерозойских бассейнах определялся степенью консолидированности земной коры в гранит-зеленокаменных областях, с которыми эти бассейны связаны, и масштабностью тектонических событий в смежных с этими областями подвижных поясах.

В бассейнах, в которых архейское гранит-зеленокаменное основание было достаточно жестким и превращено в кратонизированный стабильный блок, интенсивность наложенных деформаций раннепротерозойских толщ возрастает по направлению к краю кратона. В интра- и интра-перикратонных бассейнах первой половины раннего протерозоя, заложенных на таком основании /Хамерсли и Трансваальском/, наложенные деформации проявились, фактически, только в краевых частях кратонов. Наложённые складчатые структуры здесь имеют оси, параллельные границам кратонов, и нередко опрокинуты в их сторону. Деформированность и метаморфизм пород перикратонных бассейнов второй половины раннего протерозоя резко возрастают по направлению от кратонов. Архейское основание в этом направлении все более вовлекается в деформации. Иногда оно бывает реоморфизовано с формированием мелкокупольного стиля тектоники, как это наблюдается в бассейне Анимики. Нередко толщи наиболее удаленных частей бассейнов надвинуты по пологим надвигам в сторону кратонов.

Масштабность тектонических событий в подвижных поясах, смежных с кратонизированными гранит-зеленокаменными областями, а также общие тектонические условия, существовавшие в раннем протерозое в данном конкретном регионе, оказали существенное влияние на формирование современной структуры бассейнов. В одних регионах, как, например, на Каапваальском кратоне, тектонические события в смежных подвижных поясах выразились только в подновлении более древних структур или в расколах архейского фундамента, в той или иной мере повлиявших на тектонику раннепротерозойских толщ. В других регионах интенсивная тектоника в смежных с кратоном подвижных поясах и общее региональное сжатие привели к его наклону и перемещению относительно друг друга отдельных, слагающих его, гранитоидных блоков, что было определяющим в формировании общей структуры раннепротерозойских бассейнов. Примером такого бассейна является Криворожский.

В гранит-зеленокаменных областях, не испытавших окончательную кратонизацию к моменту накопления раннепротерозойских толщ /области

Сан-Франсиску и КМА/, на их тектонику в дальнейшем решающую роль оказали два фактора: 1 - реомобилизация пород архейского основания и подъем гранито-гнейсовых куполов, 2 - тектонические события в смежных регионах /деформации в окружающих подвижных поясах или давление соседних стабильных блоков/.

УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ТОЛЩ НА ПРИМЕРЕ КРИВОРОЖСКОГО БАССЕЙНА /по геохимическим данным/

Условия накопления раннепротерозойских толщ отражены в их составе и строении. Петрохимические и геохимические особенности пород могут существенно уточнить условия заложения бассейнов, состав областей сноса, тектонический режим, климатические условия, влияние тех или иных процессов на формирование первичных осадков.

Состав областей сноса

Для толщ крупных бассейнов раннепротерозойского железнакопления главным источником терригенного материала, несомненно, являлись породы гранит-зеленокаменных областей, с которыми они пространственно связаны. Наиболее хорошо это устанавливается для толщ перикратонных бассейнов второй половины раннего протерозоя, накопившихся на континентальном шельфе этих кратонизированных областей /хотя, в отдельных случаях, и допускается привнос материала с соседних с ними блоков/. В интракратонных бассейнах, в силу их трансверсального положения в виде обширных прогибов в пределах гранит-зеленокаменных областей, породы последних также служили основным источником терригенного материала. В случае интра-перикратонных бассейнов, заложившиеся вокруг кратонизированной гранит-зеленокаменной области -глубоководные троговые прогибы являлись "ловушками" поступавшего извне груботерригенного материала, что создавало условия для хемогенного накопления железа в пределах самого кратона.

Геологические данные /состав галек метаконгломератов и обломочной части и аксессуарных минералов метапесчаников, гранулометрический анализ последних и др./ свидетельствуют о наличии в области сноса во время накопления железорудной толщи криворожской серии трех основных типов пород: более древних осадочных пород, гранитов /как плагиогранитов, так и калиевых/ и метабазитов. Если не считать более древних осадочных пород, то можно предположить формирование осадков криворожской серии за счет смешения продуктов разрушения гранитов и метабазитов. Геохимические данные по метатерригенным

породам скелеватской и саксаганской свит /в частности, соотношения породообразующих компонентов, Co, Th, Sc/ вполне согласуются с моделью двухкомпонентного смешения осадочного материала.

Для большинства спектров редкоземельных элементов /РЗЭ/ метатерригенных пород криворожской серии характерна четко выраженная отрицательная европиевая аномалия. Появление такой аномалии для раннепротерозойских терригенных пород исследователи связывают с качественным изменением состава коры за счет внедрения калиевых гранитоидов на рубеже архея и протерозоя. Наличие таких гранитоидов в Среднеприднепровской ГЗО общеизвестно. Железистые сланцы саксаганской свиты отличаются от сланцев других свит криворожской серии пониженным содержанием РЗЭ и несколько более пологими их спектрами с возрастанием доли тяжелых РЗЭ. Первое объясняется пониженным содержанием в исходных для них породах терригенной составляющей, а второе - существенно хемогенной их природой и формированием исходных для них осадков, преимущественно, путем химического осаждения материала из морской воды.

Наиболее сложным вопросом является оценка по геохимическим данным соотношения различных пород в области сноса. С.Р.Тейлором и С.М.Мак-Леннаном /1988/ было показано, что состав тонкозернистых терригенных пород /алевролитов и сланцев/ фактически отвечает среднему составу таких областей. Для оценки состава области сноса при накоплении железистых пород криворожской серии больше всего подходит состав нежелезистых и песчаных сланцев скелеватской и саксаганской свит. Например, сопоставление содержаний кремнезема в этих породах /~55 %/, основных метавулканитах / 48-50 %/ и гранитоидах /~70 %/ свидетельствует о преобладании в области сноса основных магматических пород над кислыми. Более точно о соотношении этих пород можно судить по другим элементам, в частности редкоземельным. На основании содержаний РЗЭ можно не только оценить соотношение основных и кислых магматических пород в области сноса при накоплении терригенных пород криворожской серии /в частности, филлитовидных сланцев и метапесчаников скелеватской свиты, но и рассчитать соотношение площадей зеленокаменных поясов и гранитоидов в Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области в то время, т.е. уровень ее эрозионного среза.

Расчеты по РЗЭ, на основании принятых различных, возможно допустимых, соотношений основных типов магматических пород в области сноса при накоплении терригенных пород скелеватской свиты, указы-

вают на преобладание в Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области во время ее размыва пород зеленокаменных поясов /от 60 % до 80 %/. Наиболее согласованные оценки по содержанию La_2 и отношению La_2/Yb_2 получаются, если принять соотношения метавулканитов новокриворожской свиты, метатолцитов первого и метатолцитов второго /по К.Конди/ типов как 1:6:1 и калиевых гранитов и плагиигранитоидов как 1:10. Эти оценки дают около 70 % пород зеленокаменных поясов и около 30 % гранитоидов на эрозионном срезе Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области во время накопления скелеватской свиты.

Тектонический режим

Важным моментом для понимания тектонического режима накопления толщ раннепротерозойских бассейнов является принципиальное решение вопроса - "работала" ли во время их заложения и развития тектоника плит, т.е. имели ли место процессы новообразования океанической коры с крупными горизонтальными перемещениями литосферных плит, определившими общий набор динамических обстановок и тектонический режим конкретных участков земной коры.

Активная роль тектоники плит во второй половине раннего протерозоя несомненна, т.к. существуют типичные разрезы перемещенной океанической коры этого возраста. Такие разрезы или другие бесспорные свидетельства существования тектоники плит для конца архея и первой половины раннего протерозоя пока не известны. Есть косвенные указания на крупные горизонтальные перемещения земной коры. Крупные надвиги развиты в юго-восточной части района Квадрилатеро Ферриферо в бассейне Минас-Жерайс. По ним породы бассейна перемещены на значительные расстояния со стороны подвижного пояса в сторону кратона Сан-Франсиску. Но, существовала ли на месте подвижного пояса океаническая кора, остается неясным. В Криворожском бассейне также характерны сдвиго-надвиговые нарушения с большими горизонтальными составляющими. Особенности тектонического строения бассейна КМА наиболее логично объясняются горизонтальным перемещением Среднеприднепровского блока в сторону области КМА и их столкновением. Была ли между ними когда-либо океаническая кора - вопрос дискуссионный. Обобщение геологических данных по гранулитовому поясу Внутренняя Монголия - Восточный Хебей на севере Китайской платформы позволило интерпретировать его как ядро орогена андийского типа, сформировавшегося на активной континентальной окраине в конце архея

/К.Чен и др., 1991/. Все это свидетельствует в пользу того, что тектоника плит действительно "работала" в конце архея и первой половине раннего протерозоя. Но, раскол и расхождения блоков континентальной коры не были столь большими, как в более позднее время. Поэтому, их дальнейшие схождения и коллизии не приводили к крупномасштабным разрывам океанической коры и выводу ее на земную поверхность.

Во многих бассейнах первой половины раннего протерозоя железорудные толды подстилаются мощными вулканогенными толщами, имеющими позднеархейский возраст /около 2,7 млрд лет/ и известково-щелочной уклон. Это толща Фортескью в бассейне Хамерсли, по реконструкции А.Ф.Трендалла /1983/ накопившаяся в рифтогенных структурах, заложившихся на месте зеленокаменных поясов в южной части блока Пилбара. Среди вулканитов в ней преобладают андезиты. На Каапваальском кратоне известны лавы Вентерсдорп, предшествующие заложению Трансвальского бассейна, структурные и геохимические данные по которым позволяют сделать вывод, что они накопились в передовом рифтогенном бассейне на окраине андийского типа, заложившемся при поддвижении с севера под кратон литосферной плиты /К.Кроу и К.Конди, 1988/. Нижняя часть толщи этих лав сложена, преимущественно, толеитами, а верхняя - андезито-базальтами. Тектоническая обстановка окраин андийского типа на рубеже архея и протерозоя доказывается Е.Б.Глеваским /1990/ и для Украинского щита.

Геохимические исследования, проведенные автором, а также геологические данные, появившиеся в последние годы, позволяют утверждать, что по структурным условиям накопления, строению толщи, составу и геохимическим особенностям метабазитов новокриворожская свита, подстилающая осадочные толщи криворожской серии, во многом сходна с толщей лав Вентерсдорп и накопилась в аналогичных с ней структурных условиях - в рифтогенном бассейне на окраине андийского типа. Также как и группа Вентерсдорп, новокриворожская свита в нижней части сложена метатолитами, а в верхней - метаандезито-базальтами. О принадлежности к последним, в частности, свидетельствует положение метабазитов на диаграмме АРМ и классификационной диаграмме Дж.А.Винчестера и П.А.Флойда /1977/, использующей соотношения малоподвижных элементов $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ /. Анализ петрохимических данных по этим породам позволяет выделить среди них группы, отличающиеся своей железистостью. На диаграммах Е.Ф.Осборна /1959/ они образуют три самостоятельные тренда, отвечающие формированию исходных магматических расплавов при разных парциальных давлениях

кислорода: высокожелезистых – при низких, а низкожелезистых – при высоких. Собственно андезито-базальтам соответствуют породы со средней железистостью. Метаандезито-базальты представляют собой мелко- и среднезернистые амфиболиты, нередко с хорошо сохранившимися реликтовыми структурами, состоящие из зеленой роговой обманки, микролитов разложенного плагиоклаза и единичных разбросанных скоплений кварца и биотита. В среднезернистых разновидностях с диабазовой структурой мелкочешуйчатый биотит вместе с кварцем развивается в виде скоплений в интерстициях, образуя явные псевдоморфозы по какому-то минералу. В таких образцах, при пересчетах химических анализов на исходный минеральный состав, появляется нормативный калиевый полевой шпат.

По спектрам РЗЭ метаандезито-базальты новокриворожской свиты похожи на породы одной из трех групп архейских андезитов, выделенных К.Конди /1983/, но наиболее близки они к относительно малораспространенным в архее вулканитам – аналогам известково-щелочных вулканитов андийского типа /рис. 2/. С геохимической точки зрения, метаандезито-базальты характеризуются накоплением РЗЭ и тория по отношению к ниобию, что является особенностью магматических пород, сформировавшихся в условиях существования субдукционной зоны.

Таким образом, тектоника плит играла существенную роль в этапы, предшествующие накоплению толщ железорудных бассейнов первой половины раннего протерозоя. Но, во время накопления самих железорудных толщ, судя по геологическим и геохимическим данным, наступила стабилизация тектонического режима. Для толщи пород Криворожского бассейна хорошим показателем тектонического режима ее накопления может служить состав метапесчаников. На диаграммах М.Р.Бхаттия /1983/, наглядно иллюстрирующих по соотношениям основных породообразующих компонентов различия песчаников, образовавшихся в условиях островных дуг, активных и пассивных окраин континентов, метапесчаники скелеватской свиты криворожской серии располагаются вблизи поля песчаников пассивных окраин континентов. Их петрохимические особенности свидетельствуют об очень спокойной тектонической обстановке, способствующей длительному пребыванию осадочного материала в условиях выветривания и его хорошей сортировке. В отличие от них, метапесчаники гданцевской и глесватской свит, по соотношению породообразующих компонентов, соответствуют песчаникам активных континентальных окраин, что свидетельствует об активизации тектонического

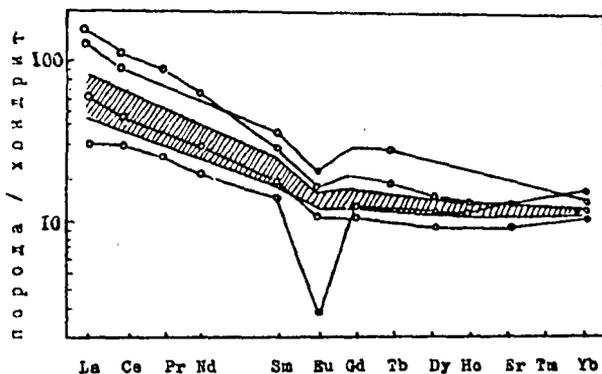


Рис. 2. Сопоставление спектров РЗЭ метаандезито-базальтов ново-
криворожской свиты /данные автора, заштрихованно/ и архейских
известково-щелочных вулканитов - аналогов современных вулкани-
тов андийского типа /С.Р.Тейлор, Дж.А.Холберг, 1977/

режима после накопления основной продуктивной железорудной толщи
саксаганской свиты.

Климатические условия

Прямых геологических свидетельств о климатических условиях
накопления толщ раннепротерозойских железорудных бассейнов крайне
мало. К ним можно отнести факты нахождения тиллитов в груботерри-
генных толщах, подстилающих или перекрывающих железисто-кремнистые
формации. Тиллиты крупных железорудных бассейнов по времени форми-
рования соответствуют Гуронскому оледенению. В бассейне Хамерсли
они слагают горизонт Метеорит Борн группы Тьюри Крик, залегающей
стратиграфически выше железисто-кремнистых пород группы Хамерсли.
В Трансваальском бассейне они образуют формацию Макганьяни, пере-
крывающую основную продуктивную толщу железистых пород. В бассейне
Анимики тиллиты обнаружены в основании самой нижней группы Чоколей
/ формации Ферн Крик хребта Менемини, Инчантмент и Пини Крик син-
клинория Маркетт /. То есть, в бассейнах первой половины раннего

протерозоя тиллиты встречаются в толщах, непосредственно перекрывающих, а в бассейнах второй половины раннего протерозоя – непосредственно подстилающих основные продуктивные горизонты железисто-кремнистых пород.

Факт наличия тиллитов в толщах железорудных бассейнов позволяет утверждать, что массовое железнакопление в раннем протерозое происходило не в экваториальной и не в полярной областях Земли, а в умеренных широтах, где смена периодов похолодания и потепления могла отражаться непосредственно на составе толщ. Расположение крупных раннепротерозойских железорудных бассейнов должно фиксировать климатический пояс, благоприятный для массового железнакопления в раннем протерозое.

Взаимное расположение раннепротерозойских железорудных бассейнов с докембрия по настоящее время, несомненно, изменилось вследствие перемещения континентов относительно друг друга. Еще 200 млн лет назад на Земле существовал единый материк Пангея, при распаде которого по системе рифтов в пермское время возникли существующие ныне континенты. Разобшение и объединение континентов происходило и раньше, в том числе и в раннем докембрии. Анализ положения крупных раннепротерозойских бассейнов в пределах единого, реконструированного для докембрия, суперконтинента показывает, что все они расположены вблизи линии правильной окружности /М.Н. Коржнев, 1991/. Длина этой окружности составляет около 32000 км, что меньше современной длины тропика. Это свидетельствует в пользу того, что климатический пояс, в котором происходило массовое железнакопление в раннем протерозое, действительно соответствовал средним широтам.

Климатические условия отражались непосредственно на составе толщ. В частности, это видно по распространенности в них карбонатных пород. Например, в бассейнах Криворожском и КМА карбонатные породы в подстилающей железисто-кремнистые образования толще редки, а в Трансваальском они наоборот широко развиты. Наиболее логично это объясняется близостью или удаленностью того или иного бассейна к экваториальной зоне, т.к. карбонатакопление происходило только в теплых водах. На существующих для раннего докембрия палеотектонических схемах Трансваальский бассейн действительно расположен наиболее близко к экваториальной зоне, а бассейны Криворожский и КМА удалены от нее.

Основным фактором, контролирующим климатические изменения, яв-

ляется содержание в атмосфере диоксида углерода, молекулы которого поглощают инфракрасное излучение поверхности Земли. Направленность этих изменений во время накопления толщ железорудных бассейнов очевидна из их общего строения. Они являются трансгрессивными, т.е. связанными с трансгрессией вод мирового океана, обусловленной потеплением климата. Потепление приводило к очень важному для железонакопления процессу – бурному цветению сине-зеленых водорослей, использующих для своей жизнедеятельности диоксид углерода и выделяющих кислород. Последний являлся активным осадителем железа. Но, снижение содержания диоксида углерода в океане и атмосфере неминуемо вело к похолоданию климата, прекращению осаждения железа и отступлению вод мирового океана. Поэтому, положение тиллитов в толщах железорудных бассейнов первой половины раннего протерозоя непосредственно над основными продуктивными горизонтами железистых пород вполне закономерно. Таким образом, Гуронское оледенение и накопление огромных масс железа в первой половине раннего протерозоя тесно взаимосвязаны.

Многие из отмеченных событий, связанных с климатическими изменениями, отражены в геохимических особенностях пород железорудных толщ. Для Криворожского бассейна, например, появление в свободной форме кислорода во время накопления железисто-кремнистых осадков фиксируется по появлению в спектрах РЗЭ в железистых породах отрицательных цериевых аномалий, а также по относительно широкому интервалу значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов из этих пород, а отступление вод мирового океана и изоляция от него бассейна – по резкому утяжелению изотопного состава серы сульфидов в перекрывающих железисто-кремнистые образования породах.

Одним из факторов, влиявшим на климатические условия в раннем протерозое, являлось отсутствие в то время наземной растительности, в настоящее время во многом определяющей специфику выветривания пород, а также скорость и способы перемещения осадочного материала к областям седиментации. При быстрой нивелировке рельефа, преобладании поверхностного смыва осадочного материала и его золотой транспортировке в засушливые периоды, быстрых испарении и перемещении дождевых вод в моря и океаны на континентах господствовали аридные условия. Подтверждением существования таких условий во время накопления скелеватской и саксаганской свит криворожской серии являются петрохимические и геохимические особенности пород этих свит, по которым метатерригенные разновидности соответствуют пескам и глинам

аридных зон. Многие из этих особенностей хорошо объясняются преобладанием в исходных для них осадках таких глинистых минералов как гидрослюда и монтмориллонит, характерных для аридного климата.

Факторы осадконакопления

Терригенный материал разрушавшихся областей сноса, при накоплении толщ железорудных бассейнов, подвергался различным химическим преобразованиям и механической сортировке. В осадках все это было отражено в их минеральном составе и вариациях содержаний породообразующих и малых элементов. Автор использовал петрохимические и геохимические характеристики для разделения метатерригенных пород криворожской серии на генетические группы и установления основных факторов, влиявших на формирование исходных для них осадков.

Данные по составу метатерригенных пород различных свит криворожской серии были подвергнуты математической обработке методом факторного анализа. В исходную матрицу были включены содержания оксидов породообразующих элементов, содержания малых элементов, индикаторные отношения породообразующих компонентов, учитывался также размер обломочной части метатерригенных пород. Кроме характеристик пород криворожской серии, в матрицу были включены данные по отдельным породам, распространенным в области сноса: архейским метавулканитам и коре выветривания гранитов. Анализ факторных диаграмм выявил следующие устойчивые группы элементов и оксидов: $\text{SiO}_2\text{-Mo}$; $\text{Na}_2\text{O-CaO-Sr}$; $\text{MgO-Mn-P}_2\text{O}_5\text{-Sc-V}$; $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-CO}_2\text{-S-Cu}$; Ni-Cr ; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Th-Zr-Ba-Pb-Ga-Zn-Y}$; $\text{K}_2\text{O-Rb-Li-Cs}$. Эти ассоциации элементов, в большинстве своем, легко отождествляются с отдельными минералами горных пород области сноса /пироксенами, амфиболами, плагиоклазом/ и осадочных пород /кварцем, глинистыми минералами и др./. Взаимное их расположение на факторных диаграммах соответствует ряду устойчивости минералов при выветривании. Ассоциация элементов, соответствующая кварцу, располагается в противоположных частях диаграмм, чем группы элементов, соответствующие другим минералам, в частности глинистым. Это обусловлено механическим разделением кварца и глинистых минералов в осадочном процессе. Ось этого геологического фактора в многомерном факторном пространстве совпадает с вектором отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Вторым геологическим фактором, несомненно, являлось химическое разложение осадочного материала. Ось этого фактора располагается между векторами отношений $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и $\text{SiO}_2/(\text{CaO}+\text{MgO})$. Третьим фактором осадконакопления для метатерригенных пород криворожской

серии было хемогенное осаждение в терригенные осадки железа. Это был довольно существенный фактор при накоплении осадков саксаганской свиты.

Метатерригенные породы скелеватской и саксаганской свит на факторных диаграммах обособляются в несколько групп, которые отличаются петрохимическими характеристиками /содержанием MgO , отношениями K_2O/Na_2O и SiO_2/Al_2O_3 и др./ . Для выделенных групп сланцев эти различия легко объясняются преобладанием в исходных осадках тех или иных глинистых минералов, в частности гидрослюд или монтмориллонита. Закономерности площадного распространения глинистых минералов /А.М.Цехомский, 1983/ позволяют отождествлять выделенные группы с определенными зонами первичного седиментационного профиля. К глубоководным частям этого профиля закономерно снижаются содержания SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Sc , Sr , Nb , Zr , увеличивается $Fe_{обд.}$, MgO , P_2O_5 . Концентрации отдельных элементов связаны с определенными зонами, например Li , Rb , Th , Ba - с зоной преимущественно гидрослюдистых глин, а Na_2O , Mn , Cu - с зоной смешанных глин первичного профиля.

Метаосадочные породы гданцевской и глееватской свит криворожской серии на факторных диаграммах занимают положение вдоль оси механического перемива осадочного материала, что обусловлено большой тектонической подвижностью района при накоплении исходных для них осадков и коротким нахождением пород области сноса в условиях выветривания.

На геохимические особенности пород криворожской серии оказали влияние и процессы вулканизма, хотя прямых свидетельств его проявления при накоплении осадков скелеватской и саксаганской свит крайне мало. Среди филлитовидных сланцев, залегающих ниже и выше талькового горизонта, установлены разновидности, по геохимическим особенностям очень близкие к тальковым сланцам, образовавшиеся, вероятно, за счет осадков, содержащих туфогенный материал. В спектрах РЗЭ железисто-кремнистых пород нередко отмечается европиевый максимум, что, по мнению многих исследователей, является следствием поступления в зону осаждения железисто-кремнистых осадков гидротермальных вод, обогащенных европием, т.е. участия в их образовании процессов вулканизма. Об этом же свидетельствует и характер распределения в них германия /В.М.Григорьев, 1967/.

Эволюция условий осадконакопления

Изменение условий седиментации в раннепротерозойских бассейнах отразилось на геохимических особенностях пород слагающих их толщ.

Достаточно хорошо это проявилось и в Криворожском бассейне, для которого эволюцию условий осадконакопления можно проследить по изменению характера распределения в породах породообразующих компонентов и элементов-примесей, включая РЗЭ, и изотопного состава серы сульфидов.

Геохимические особенности пород новокриворожской свиты и характер их распространения, как уже упоминалось, свидетельствуют об их формировании в условиях рифтогенного бассейна на активной континентальной окраине. Изотопный состав серы сульфидов в них $\delta^{34}\text{S}$ от $-0,7$ до $+1,0$ ‰/ близок к троилитовой фазе метеоритов, что указывает на практическое отсутствие фракционирования серы в то время.

Накопление осадков скелеватской и саксаганской свит в наложенных геосинклинальных прогибах в спокойной тектонической обстановке фиксируется по составу, общему строению и латеральной изменчивости толщ этих свит, а также по петрохимическим и геохимическим особенностям пород. На господство аридных условий в то время указывают вариации содержания TiO_2 и отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в метапесчаниках и сланцах и их геохимические особенности, наиболее хорошо объясняемые преобладанием в исходных осадках среди глинистых минералов гидрослюда и монтмориллонита. Появление в бассейне седиментации кислорода на границе скелеватской и саксаганской свит устанавливается по наличию отрицательных цериевых аномалий, а гидротермальный приток — положительных европиевых аномалий в спектрах РЗЭ железисто-кремнистых пород. Расширение интервала изменения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов от $-5,7 \pm +3,0$ ‰ в скелеватской свите до $-6,3 \pm +3,5$ ‰ в сланцевых и $-16,5 \pm +4,6$ ‰ в железистых горизонтах саксаганской свиты объясняется усилением сульфатредукции в условиях трансгрессии с изменением системы в сторону ее открытости и появлением свободного кислорода.

После перерыва в осадконакоплении на границе саксаганского и гданцевского времени, наблюдается резкое изменение условий седиментации. Состав и геохимические особенности пород указывают на тектонический режим активной континентальной окраины и сохранение аридных условий. Сульфатредукция в гданцевское время происходила в изолированном бассейне, богатом органикой, с ограниченным доступом сульфатных вод, что обусловило резкое изменение состава серы сульфидов, образующихся в осадках при диагенезе, в сторону его утяжеления $\delta^{34}\text{S}$ $+2,5 \pm +18,6$ ‰/. Но в верхних частях гданцевской свиты и в глееватской свите этот изотопный скачок сглаживается $\delta^{34}\text{S}$

соответственно $-2,8 \pm +8,1 \%$ и $-3,9 \pm +6,8 \%$ /, что указывает на изменение условий в строю большей открытости системы.

ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТЫЕ ФОРМАЦИИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ РУДЫ

Железисто-кремнистые формации раннего докембрия разнообразны по своему возрасту, составу, строению, ассоциациям с вмещающими породами и другим особенностям. Это отражено во многочисленных их классификациях с выделением различных типов формаций. Общезвестны такие типы как вулканогенный, вулканогенно-осадочный и осадочный или типы Алгома /вулканогенный/ и Сьюпириор /осадочный/. Хотя, выделение чисто осадочного типа должно быть поставлено под сомнение, т.к. в большинстве формаций, относимых к этому типу, довольно широко развиты вулканы или устанавливаются следы вулканической деятельности. Формации типа Алгома больше характерны для архея, где они накапливались в специфической тектонической обстановке в эвгеосинклинальных бассейнах, а типа Сьюпириор - для второй половины раннего протерозоя. Большинство же раннепротерозойских железисто-кремнистых формаций, не содержащих гранул и оолитов, столь характерных для железистых пород типа Сьюпириор, накопилось в первой половине раннего протерозоя. К ним относятся железисто-кремнистые формации бассейнов Хамерсли, Трансваальского, Минас-Жерайс, Криворожского и КМА.

Во многих толдах, слагающих раннепротерозойские бассейны, железисто-кремнистые породы встречаются на нескольких стратиграфических уровнях. Причем, ассоциации пород, вмещающих их или переслаивающихся с ними, различны для каждого из них. В Криворожском бассейне нижний уровень накопления железисто-кремнистых пород характеризуется их ассоциацией с железистыми сланцами /саксаганская свита/, а верхний - с высокоуглеродистыми сланцами, карбонатными породами и метапесчаниками /гданцевская свита/. Ассоциации пород, характерные для саксаганской свиты криворожской серии, являются основными продуктивными железорудными толдами в бассейнах КМА и Хамерсли. Подобные им ассоциации в подчиненном количестве встречаются в бассейнах Минас-Жерайс /группа Тамандуа/ и Сингхбум /группа Горумахисани/. Железисто-кремнистые породы, в ассоциации с высокоуглеродистыми сланцами и доломитами, входят в состав основных продуктивных толд в бассейнах Минас-Жерайс и Трансваальском, частично в бассейне Хамерсли. В Трансваальском бассейне стратиграфически выше основ-

ной продуктивной формации Куруман в серии Грикваленд распространены железисто-кремнистые породы, переслаивающиеся с известняками и марганцевыми рудами. Аналогичная ассоциация в бассейне Сингхбум является основным продуктивным горизонтом /группа Ноамунди/. Более высокий уровень в раннем протерозое представляют железисто-кремнисто-сланцевые формации с гранулами и оолитами, распространенные в бассейне Анимики, Лабрадорском трого и бассейне Набберу.

Таким образом, в раннепротерозойских бассейнах наблюдается несколько ассоциаций железисто-кремнистых и вмещающих их пород: железисто-кремнисто-сланцевая, железисто-кремнисто-доломитовая, марганцево-железисто-кремнистая и железисто-кремнисто-сланцевая с гранулами и оолитами. Эти ассоциации можно назвать типами раннепротерозойских железисто-кремнистых формаций.

Основная масса железисто-кремнистых пород в раннепротерозойских железорудных бассейнах является бедными рудами, но с этими породами связаны и месторождения богатых железных руд. Теория образования последних детально разработана в трудах Я.Н.Белевцева. Сравнительный анализ, проведенный автором, показал, что большинство богатых железных руд этих бассейнов относится к гипергенным образованиям. Исключением являются Криворожский бассейн и, частично, бассейн КМА, где широко развиты метаморфогенные богатые железные руды. Это связано со сложной геологической историей этих бассейнов, толщи которых испытали наибольшие деформации и метаморфизм. Наличие метаморфогенных богатых железных руд вероятно и в некоторых других раннепротерозойских бассейнах. Но, там отделить их от аналогичных по составу и резко преобладающих по объему гипергенных руд не представляется возможным. В тоже время, для Криворожского бассейна можно предположить присутствие какой-то части дометаморфических гипергенных железных руд, затерянных в основной массе метаморфогенных руд, что подтверждается наличием таких руд в обломках в конгломерато-брекчиях в основании гданцевской свиты.

Геологические данные по гипергенным железным рудам докембрия свидетельствуют о том, что, в большинстве случаев, точно также как и метаморфогенные, эти руды контролируются складчатыми структурами. Выщелачиванию и остаточному обогащению чаще всего подвергаются крылья синклиналильных или замки антиклиналильных складок, расположенные близко к поверхности. Во всех раннепротерозойских бассейнах основная продуктивная толща железисто-кремнистых пород отделена от вышележащих образований перерывом, во время которого она, как правило,

испытала деформации и частичный размыв. В это время железисто-кремнистые породы могли быть подвергнуты гипергенному выщелачиванию с повышением их пористости в определенных зонах, контролируемых складчатыми структурами, в дальнейшем послуживших путями миграции метаморфических флюидов. В качестве примера приуроченности метаморфогенных богатых железных руд к крыльям синклиналиных и замкам антиклиналиных складок можно привести данные автора по Галещинскому месторождению Кременчугского синклинория /М.Н.Коржнев, 1984/.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАССОВОЕ ЖЕЛЕЗОНАКОПЛЕНИЕ В ДОКЕМБРИИ

Массовое железнакопление в докембрии, как и любое природное явление, имело свою предысторию. Необходимые геологические и физико-химические условия для него сложились как результат эволюционного развития земной коры, гидросферы и атмосферы. Структурная неоднородность коры, совместно с климатической зональностью, определила места заложения крупных бассейнов железнакопления в раннем протерозое.

Основные события в геологической истории происходят циклически. Есть своя цикличность в проявлении тектонической активности, вулканизма, гранитоидного магматизма, седиментации, климатических изменений и т.д. Обусловлено это как внутренними, так и внешними причинами. Свою цикличность, например, имеет мантийная конвекция, выражающаяся в периодической смене одноячейковой системы конвекции на двуячейковую и наоборот. Эпохи одноячейковой системы конвекции соответствуют периодам существования единого суперконтинента, а двуячейковой – его распада. В основу представлений автора об эволюции литосферы в докембрии положена именно эта цикличность, обоснованная А.С.Мониным и О.Г.Сорохтиным /1982/ и детализированная Ч.Б.Ворукаевым /1985/, которые хорошо объясняют периодичность смены эпох тектонической активности, вулканизма и гранитоидного магматизма. Но, вулканизм и гранитоидный магматизм имеют не только временные, но и пространственные закономерности проявления. Так, например, гранитобразование с возрастом 3,0-2,8 млд лет наиболее широко проявлено на Восточно-Европейской платформе, в Южной Африке и в Южной Америке, а с возрастом 2,6-2,3 млд лет – в Северной Америке и блоке Иилгарн в Западной Австралии. Также по разным сегментам континентальной коры разнесены эпохи базальтового вулканизма в зеленокаменных поясах. Автор объясняет это различным пространственным положением конвекционных ячеек в разные периоды существования двуя-

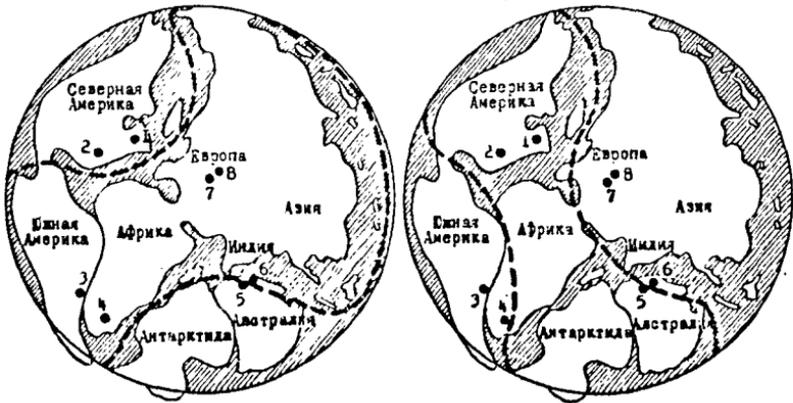


Рис. 3. Предполагаемое положение конвекционных ячеек в докембрий в разные периоды существования двуячейковой системы конвекции в мантии /в качестве основы использована реконструкция единого суперконтинента М.Горай, 1984/
Железорудные бассейны: 1 - Лабрадорский, 2 - Анимики, 3 - Минас-Жерайс, 4 - Трансваальский, 5 - Набберу, 6 - Хамерсли, 7 - Криворожский, 8 - КМА

чейковой системы конвекции в мантии /рис. 3/.

Массовое железнакопление в раннем протерозое является, прежде всего, результатом геохимической эволюции гидросферы и атмосферы и проявилось на переломном ее этапе. Но, то, в каких толщах и геологических структурах оно было реализовано, зависило от конкретной геологической обстановки.

Недосыщенность кислородом на протяжении всей ранней истории Земли не только атмосферы и гидросферы, но и литосферы, обусловила в то время формирование магматических расплавов, обогащенных железом, и, в конечном счете, обогащенность железом раннедокембрийской коры. Мобилизации железа в гипергенных процессах способствовало существование практически на протяжении всего архея единого суперконтинента с господствовавшим в его пределах платформенным режимом, обуславливавшим очень длительное нахождение пород и продуктов их разрушения в условиях выветривания. Высвобождавшееся из кор вывет-

ривания железо попадало в воды мирового океана, служившего, с одной стороны, его резервуаром, а с другой - буфером, задерживавшим терригенный материал. Структурами континентального сегмента земной коры, активно жившими в архее, были гранит-зеленокаменные области, представлявшие собой в то время эвгеосинклинальные бассейны. Активный магматизм привел в конце архея к их кратонизации и выводу на уровень эрозии вулканогенных толщ зеленокаменных поясов, богатых железом, что резко увеличило поступление последнего в воды мирового океана. В результате кратонизации эти области приобрели жесткость и реагировали на глобальные тектонические движения как единые тела. Разрядка напряжений происходила в разделяющих их участках земной коры, которые картируются сейчас как подвижные пояса. К этому периоду приурочено заложение бассейнов железнакопления, вмещающих большинство известных на нашей планете запасов железных руд. В зависимости от размеров и конкретной истории геологического развития гранит-зеленокаменных областей, их окончательная кратонизация происходила по-разному и в разные отрезки времени. Соответственно этому, в разное время в раннем протерозое и по-разному закладывались связанные с ними крупные бассейны железнакопления.

Во многих гранит-зеленокаменных областях, таких как Каапваальская, Пилбара, Среднеприднепровская, последней вспышкой магматической активности был вулканизм с возрастом примерно 2,7 млрд лет, связанный с рифтогенезом, проявившимся в краевых частях этих областей. Накопившиеся в этот период вулканогенные толщи впоследствии вызвали прогибание этих частей гранит-зеленокаменных областей с заложением крупных бассейнов железнакопления со спокойным тектоническим режимом. Глобальной причиной этого вулканизма послужила смена одноячейковой системы конвекции в мантии на двуячейковую, приведшая к расколу единого суперконтинента по зоне, протягивающейся от блока Иилгарн в Западной Австралии до блока Сьюпириор в Северной Америке. Океаническая кора, образовавшаяся в этой зоне, пододвигалась под континентальную кору Евразии, с одной стороны, и Южной Африки и Южной Америки - с другой, что создавало тектоническую обстановку окраин андийского типа в этих двух зонах.

Времени 2,8-2,7 млрд лет назад соответствует наибольшая по своей интенсивности эпоха архейского вулканизма, отмеченная накоплением мощных вулканогенных толщ в зеленокаменных поясах Канадского щита в Северной Америке, блоков Зимбабве в Южной Африке и Иилгарн в Западной Австралии. С этой эпохой связаны последующие

потепление климата, таяние полярных шапок и трансгрессия насыщенных железом вод мирового океана, т.к. вулканизм приводил к повышению содержания в атмосфере диоксида углерода и, как следствие, созданию парникового эффекта.

Начало трансгрессии уже попало на период существования одной ячейковой конвекции в мантии, когда сиалические массы были спаяны в единый суперконтинент. Проникновение в его пределы океанических вод стало возможно только тогда, когда начался рифтогенез в зоне, протягивающейся от Южной Америки до Восточно-Европейской платформы. Проявившиеся здесь условия растяжения способствовали высвобождению и изостатическому выравниванию тел кратонизированных гранит-зеленокаменных областей. Одни из них испытали прогибание отдельных их частей или общие наклоны с заложением в опущенных участках интракратонных бассейнов /области КМА, Среднеприднепровская, Пилбара/, другие, несколько большие по размеру, - небольшой общий подъем с формированием интра-перикратонных бассейнов, мелководных в пределах кратонов и переходящих в глубоководные рифтогенные в их обрамлении /области Каапваальская и Сан-Франсиску/.

Потепление климата в первой половине раннего протерозоя привело еще к одному последствию, оказавшемуся исключительно важным для осаждения железа из океанических вод, - бурному цветению сине-зеленых водорослей в благоприятном для этого климатическом поясе в прибрежных зонах. При этом водоросли использовали диоксид углерода и продуцировали кислород, который окислял и осаждал железо /Ю.П. Мельник, 1986/. В результате, в период 2,5-2,3 млд лет назад, в этом климатическом поясе в бассейнах накопились огромные массы железа. Активное потребление сине-зелеными водорослями диоксида углерода привело к похолоданию климата и резкому снижению интенсивности их цветения, что, наряду со снижением концентрации железа в океане, вызвало прекращение железнакопления. В результате регрессии, начавшейся еще при накоплении железистых осадков, бассейны потеряли связь с мировым океаном.

Климатический пояс, в котором в раннем протерозое осуществлялось массовое железнакопление зафиксирован расположением крупных железорудных бассейнов на едином, реконструированном для докембрия, суперконтиненте. Этот пояс отвечал средним широтам, в котором господствовали аридные условия.

Геологическая обстановка массового железнакопления во второй половине раннего протерозоя несколько отличалась от таковой «в его

первой половине. Условия для него возникли при очередной смене одноячейковой системы конвекции в мантии на двуячейковую, отмеченной эпохой гранитообразования 2,1-1,9 млрд лет назад на Восточно-Европейской платформе и в Южной Америке. В это время в зоне, трассирующей через блоки Йилгарн в Западной Австралии и Сьюпириор в Северной Америке, начался рифтогенез. Оказавшись в зоне растяжения, эти крупные кратонизированные блоки испытали изостатический подъем, и в их обрамлении заложилась перикратонные бассейны. После осадочения основной массы железа в первой половине раннего протерозоя, его ресурсы в водах мирового океана были в значительной степени снижены. Проникновение последних по системе рифтов и загопление шельфовых областей на периферии образовавшихся континентальных блоков происходило в условиях относительно холодного климата. Поэтому цветение водорослей не было столь активным, а основным осадителем железа служил уже появившийся к тому времени в атмосфере кислород. Последнее подтверждается наличием оолитовых и гранулярных структур в железисто-кремнистых осадках, свидетельствующих об их формировании в непосредственной близости от береговой линии в волноприбойной зоне.

Эволюция структуры бассейнов в последующие геологические эпохи определялась глобальными тектоническими перестройками, связанными с изменением типа конвекции в мантии. Так, основные деформации в бассейнах Криворожском, КМА, Хамерсли, Трансваальском, Минас-Жерайс связаны с процессами раздвигания коры около 1,8 млрд лет назад в океаническом бассейне, заложившемся в зоне, протягивающейся от Австралии до Северной Америки. В зависимости от конкретного положения бассейнов, в них в разной степени проявились складчатые и разрывные деформации, в отдельных случаях с последующим крупномасштабным надвиганием разных частей бассейнов друг на друга. С замыканием этого океанического бассейна в последующее время связаны основные тектонические события в Лабрадорском трого и бассейне Анимики в Северной Америке и бассейне Набберу в Западной Австралии. В первых двух бассейнах зафиксированы случаи надвигания океанической коры.

З а к л ю ч е н и е

Предметом данного исследования являлись крупные железорудные бассейны. Их изучение проливает свет на очень интересный период истории нашей планеты – ранний протерозой. Как свидетельствуют геологические данные, это был переломный период не только в геохимической эволюции, с которым связано накопление огромных масс железа, но и в эволюции литосферы, создавший для этого благоприятные структурные условия. Автор попытался подойти к изучению феномена массового железнакопления, сопоставляя данные по положению крупных железорудных бассейнов в структуре докембрия, их тектоническому строению, эволюции архейских структур, с которыми эти бассейны пространственно связаны, составу, строению, геохимическим особенностям, возрасту и стратиграфическому расчленению слагающих их толщ. Такая направленность исследования отражает один из возможных подходов в изучении этого явления. Перспективным направлением остается изучение самих железисто-кремнистых пород, являющихся непосредственными носителями информации о времени массового железнакопления. Огромный материал, накопившийся к настоящему моменту по структурно-текстурным и геохимическим особенностям этих пород, требует своего обобщения и должен являться предметом специального исследования. Отдельным направлением для железисто-кремнистых формаций докембрия, несомненно, должно быть и обобщение данных по геохимии стабильных изотопов /серы, углерода, кислорода, водорода/, вариации которых являются чувствительными индикаторами условий среды при отложении, диагенезе и метаморфизме исходных осадков. Необходимо также дальнейшее углубление изучения распределения в породах породообразующих и малых элементов /особенно редкоземельных/. Возможности этого направления еще далеко не исчерпаны. Его развитие может привести к созданию новых методов расчленения толщ докембрия, корреляции магматических и метаморфических образований, восстановления первичных условий их формирования. Автор надеется, что проведенные им исследования внесут свой вклад в понимание истории развития земной коры, причин и геологической обстановки массового железнакопления в докембрии и будут способствовать эффективности геологических прогнозов.

Список основных работ по теме диссертации

1. О структурном контроле оруденения на Галещинском месторождении богатых железных руд // Петрология, минералогия и рудообразование в пределах Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1984, с.71-74.
2. Основные признаки происхождения железистых кварцитов тараташского комплекса Южного Урала // Препринт ИГЭМ, Киев, 1984, 32 с. /совместно с В.Ю.Фоменко/.
3. Изучение структур, контролирующих залежи богатых железных руд саксаганского типа с помощью проекций /по данным буровых скважин/ // Докембрийские структуры по данным аэрокосмических и наземных геологических исследований. Препринт ИГЭМ, 1984, с.53-57.
4. Особенности строения железорудной толщи Правобережного района Украинского щита // Геол. журнал, 1986, 1, с.38-51 /совместно с В.Ю.Фоменко, Е.Ш.Пиковским, С.И.Терещенко, И.Е.Коростышевским/.
5. Корреляция железисто-кремнистых формаций основных стратиграфических подразделений раннего докембрия Украинского, Балтийского щитов и Курской магнитной аномалии // Тез. докл. 1У регион. петр. совещ., Петрозаводск, 1988, с.195-196 /совместно с Н.П.Щербаком, В.Я.Горьковцем, Е.М.Крестинным/.
6. Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Стратиграфия. - Киев: Наукова думка, 1988, с.43-49, 67-81, 172-179 /совместно с Н.П.Щербаком, Я.Н.Белевцевым, В.Ю.Фоменко и др./.
7. Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Типы формаций. - Киев: Наукова думка, 1988, с. 81-94, 95-105, 172-177 /совместно с В.Ю.Фоменко, М.А.Ярошук, Г.В.Жуковым, В.В.Скворцовым/.
8. Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Структуры месторождений и рудных районов. - Киев: Наукова думка, 1989, с.88-91, 123-125 /совместно с В.Ю.Фоменко, Е.Ш.Пиковским/.
9. Перестройка архейского структурного плана континентального сегмента земной коры и ее роль в массовом железнакопении в раннем докембрии // Тез. докл. III Всес. школы "Структурный анализ крист. к-сов и геол. картирование", Киев, 1990, ч.П, с. 35-37.
10. О времени накопления железисто-кремнистых формаций криворожского типа // Геол. журнал, 1990, 6, с. 85-88.
11. О закономерности расположения крупных раннепротерозойских железорудных бассейнов // Геол. журнал, 1991, 1, с. 67-71.

12. Генетические особенности железистых кварцитов глубокометаморфизованных комплексов // Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Генезис руд. - Киев: Наукова думка, 1991, с. 115-119 /совместно с Е.Ш.Пиковским, М.А.Ярошук/.

13. Эволюция условий накопления пород криворожской серии по геохимическим и изотопным данным // Геол. журнал, 1992, 3, с. 93-99 /совместно с Ю.А.Фоминим/.

14. Проблема типизации железисто-кремнистых формаций докембрия в связи с ролью вулканитов в составе толщ крупных железорудных бассейнов // Вулканизм в структурах Земли и разных геодинамических обстановках. - Тез. докл. IX палеовулк. симпозиума, Иркутск, 1992, с. 72-73.

15. Геохимические особенности метавулканитов новокриворожской свиты как показатель тектонических условий заложения Криворожского бассейна // Там же, с. 99-100.

16. Железисто-кремнистые формации докембрия. Железонакопление в докембрии. - Киев: Наукова думка, 1992, 220 с. / совместно с Я.Н.Белевцевым, Д.А.Куликом и др./.

17. Геохимические особенности метабазитов Криворожского бассейна // ДАН Украины, 1993, 1, с. 70-74 /совместно с В.В.Покалюком/.

18. Состав области сноса при накоплении осадков скелеватской и саксаганской свит криворожской серии // ДАН Украины, 1993, 2, с. 121-124.