

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Т.В.Донской,
**«РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ
СИБИРСКОГО КРАТОНА»**,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.01 – общая и региональная геология и 25.00.04 – петрология, вулканология

Цель и актуальность исследования Работа Т.В.Донской посвящена фундаментальной проблеме Наук о Земле, связанной с особенностями зарождения и формирования континентов. В диссертации эта проблема решается на основе изучения проявлений гранитоидного магматизма, закономерно изменявшихся в ходе становления Сибирского континента. Этим определяется актуальность исследования, так как многие стороны геологической эволюции кратона на стадии его становления остаются до сих пор слабо изученными, несмотря на то, что имеют большое значение для решения широкого круга геологических задач, в том числе имеющих практические приложения.

Обоснованность и достоверность научных положений. Решаемая в работе проблема двуединая, требующая, с одной стороны, глубокого знания региональной геологии и, с другой, квалифицированного понимания природы и механизмов гранитоидного магматизма. Этим, собственно, и обусловлена необходимость защищать работу по двум специальностям. Приведенные для защиты данные были получены в ходе многолетних полевых исследований. Собранный материал был обработан современными аналитическими методами и опубликован в многочисленных статьях в ведущих отечественных и зарубежных геологических журналах. По теме диссертации опубликовано более 45 научных работ, в том числе 25 статей в рецензируемых научных журналах и 1 коллективная монография. Изложенные в этих работах научные положения, выводы и рекомендации были приняты геологическим сообществом и используются, не только при решении проблем региональной геологии, но и при глобальных корреляциях, что является важнейшим критерием их надежности, новизны и обоснованности.

Научная новизна исследования определяется тем, что в ходе работ был получен ряд результатов фундаментального значения, раскрывающих особенности структурной эволюции Сибирского кратона в раннем протерозое и соответствующей ей эволюции гранитоидного магматизма. Кроме того, впервые выполнена геохимическая и изотопно-геохимическая типизации раннепротерозойских гранитоидов кратона, установлены источники их магм и определены условия их формирования. Определена индикаторная роль гранитоидов в палеотектонических реконструкциях и на этой основе оценены

геодинамические условия, контролировавшие становления структуры Сибирского кратона на разных стадиях ее формирования.

Практическая значимость. Результаты исследований реперных магматических комплексов являются важным вкладом в разработку схем магматизма, используемых при геологическом картировании. Полученные результаты также несомненно важны для глобальных геодинамических реконструкций.

Содержание диссертации. В ходе проведенного исследования Т.В.Донской пришлось решить ряд важных задач, в том числе, обобщить огромный опубликованный материал, провести необходимые геологические исследования на ключевых объектах и выполнить их геохронологическое изучение, изучить состав магматических пород, оценить магматические источники и реконструировать геодинамические условия их формирования. В результате была построена общая схема согласования проявлений магматизма с другими эндогенными процессами, протекавшими на тех или иных стадиях формирования и преобразования коры Сибирского кратона.

Результаты проведенной работы отражены в диссертации объемом 339 страниц, не считая библиографического списка, насчитывающего 373 цитированных источника, и приложений с геохронологическими и аналитическими данными. Текстовая часть работы состоит из введения, 9 глав и заключения. В вводной части дана постановка проблемы и конкретных задач, которые решались при проведении этой работы.

В первой главе РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКАЯ ЭРА В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ дан обзор сведений о позднеархейской – раннепротерозойской эпохе в развитии Земли и, в частности, показано, что одним из ключевых периодов в мировой геологической истории стал орогенез на временном интервале 2.2 – 1.8 млрд лет. Он проявился в ряде кратонов Земли и, в частности, стал важнейшим корообразующим процессом для территории Сибири.

Во второй главе ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГРАНИТОИДОВ В РАЗНЫХ БЛОКАХ КРАТОНА дана геологическая характеристика основных структурных единиц кратона, а также приведены сведения о раннепротерозойском гранитоидном магматизме в их пределах. Систематизация этих данных позволила выделить восемь этапов проявления гранитоидного магматизма, сопряженных с различными стадиями эволюции коры. Ранние этапы (древнее 2.04 млрд лет) отражают локальные магматические события в пределах отдельных блоков кратона. Хронологические и вещественные различия развитых в их пределах гранитов свидетельствуют о независимом

развитии этих блоков и их территориальной обособленности в интервале, древнее 2 млрд лет.

Последующие этапы магматизма проявились более или менее согласованно в разных структурных блоках и сопоставляются с определенными рубежами в формировании собственно кратона. В интервале 2.06 – 2.00 млрд лет в пределах отдельных участков южной–юго-восточной части Сибирского кратона, формировались комплексы, типичные для островных дуг и обладающие Nd-изотопными характеристиками, типичными для ювенильной коры. В интервале 2.0 – 1.87 млн лет произошла сшивка различных блоков Сибири в единый кратон. Более поздние магматические процессы протекали в пределах сформированного континента.

Важным результатом этой главы стала демонстрация того, что характеристики гранитоидного магматизма менялись во времени, реагируя на изменения геодинамических условий магнеобразования. Это стало побудительной причиной для более полного анализа такого магматизма. Соответствующий анализ выполнен в последующих главах диссертации.

В третьей главе ГРАНИТОИДЫ, НЕ СВЯЗАННЫЕ СО СТАНОВЛЕНИЕМ СТРУКТУРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (2.5 – 2.4 И 2.15 – 2.04 МЛРД ЛЕТ) приведены данные о гранитоидах, возникших в интервалах 2.5 – 2.4 и 2.15 – 2.04 млрд лет. Отмечена их связь с разобщенными и независимо развивавшимися террейнами. Показано, что эти гранитоиды обладают существенно различными геохимическими и изотопными $\epsilon\text{Nd}(t)$ характеристиками, свидетельствующими о разнообразии их источников и разных обстановках формирования. Сделан справедливый вывод, что на временном интервале 2.50 – 2.04 млрд лет Сибирского кратона, как единой структуры, не существовало и формирование соответствующих гранитоидов определялись теми геодинамическими режимами, которые определяли автономное развитие того или иного пространственно обособленного в то время блока.

В четвертой главе НАДСУБДУКЦИОННЫЕ ГРАНИТОИДЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (2.06 – 2.00 МЛРД ЛЕТ) рассмотрены закономерности распространения и вещественные характеристики гранитоидов, возникших на стадии, предшествовавшей консолидации Сибирского кратона. Показано, что эти граниты формировались в пределах блоков южной – юго-восточной (в современных координатах) части Сибирского кратона, обладающих изотопными характеристиками ювенильной континентальной коры. Показано, что большинство из этих гранитоидов обнаруживает геохимические характеристики, близкие гранитам I-типа. На классификационных геохимических диаграммах их составы попадают в поле гранитов вулканических дуг, что позволило

связать их формирование с режимом островных дуг. Приведенные данные позволили говорить о том, что в интервале 2.06 – 2.00 млрд лет в южном обрамлении Сибири существовала надсубдукционная обстановка, приведшая к образованию здесь палеопротерозойской ювенильной коры.

В пятой главе КОЛЛИЗИОННЫЕ ГРАНИТОИДЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (2.00 – 1.87 МЛРД ЛЕТ) рассмотрены гранитоиды, сформировавшиеся при объединении ранее разрозненных блоков кратона в единую континентальную структуру. Процесс объединения растянулся на достаточно продолжительное время и протекал стадийно. При этом каждая из стадий соответствовала объединению континентальных блоков в более крупные группировки и характеризовалась образованием соответствующих по возрасту гранитоидов. Так, в интервале (2.00 – 1.95 млрд лет) произошло объединение Анабарского, Алданского и Оленекского блоков. На следующем этапе (1.95 – 1.90 млрд лет) произошло завершение коллизионных процессов в пределах Анабарского супертеррейна, а также окончательная сборка юго-восточной части кратона. Финальный этап коллизионного магматизма (1.90 – 1.87 млрд лет) отразил присоединение Ангаро-Канского, Бирюсинского и Шарьжалгайского блоков к сформированному ядру кратона. Предположительно, в это же время к нему был присоединен и крупный Тунгусский супертеррейн.

Гранитоиды этой стадии в большинстве своем отвечают умеренно-щелочным породам. На классификационных диаграммах большинство из них попадает в поле постколлизионных гранитов. Геохимически они достаточно разнородны и отвечают разным типам «алфавитной» классификации гранитоидов. Выявленные различия в химических составах гранитоидов автор достаточно убедительно объясняет разнообразием составов источников, подвергавшихся плавлению, что подтверждается широкими вариациями величины $\epsilon\text{Nd}(t)$ от слабо положительных до сильно отрицательных. По результатам проведенных исследований был сделан вывод, что все эти гранитоиды были сформированы за счет плавления коровых источников.

Глава ГРАНИТОИДЫ ЮЖНО-СИБИРСКОГО ПОСТКОЛЛИЗИОННОГО МАГМАТИЧЕСКОГО ПОЯСА (1.88 – 1.84 МЛРД ЛЕТ) занимает наибольший объем в диссертации и посвящена породам, зафиксировавшим окончательную стадию формирования структуры Сибирского кратона. Эти породы распределены по южной периферии кратона и отражают собой новый этап в развитии структуры кратона, связанным с его вероятным вхождением в состав палеопротерозойского суперконтинента Колумбия. Гранитоиды этой возрастной группы демонстрируют определенные региональные различия геохимических характеристик и отвечают разным геохимическим

типам. Их различия, как полагает Т.В.Донская, связаны с разными геологическими условиями. Так, разнообразие составов гранитоидов юго-западной части кратона связывается с разнообразием субстратов их плавления. Относительная однородность пород Байкальского выступа и их сходство с анорогенными гранитами А-типа объяснено формированием пород в обстановке внутриконтинентального растяжения. Для гранитоидов Алданского щита отмечается их сходство с гранитами, формирующимися в коллизионной обстановке. Отмечено также, что различия состава пород коррелируются с возрастом завершения коллизионных событий в пределах того или иного блока.

Глава 7. ВНУТРИПЛИТНЫЕ (АНОРОГЕННЫЕ) ГРАНИТОИДЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (1.76 – 1.71 МЛРД ЛЕТ) посвящена характеристике пород, локально проявившихся в пределах юго-западной и юго-восточной частей кратона. Их формирование произошло через ~100 млн лет после образования Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса. Кислые породы этих ассоциаций близки гранитам А-типа и на классификационных диаграммах попадают в поля составов внутриплитных гранитов. Изотопные характеристики гранитоидов свидетельствуют о смешанном корово-мантийном их источнике, а одновременное с ними формирование дайковых роев основного состава указывает на связь этих ассоциаций с процессами локального внутриконтинентального растяжения, проявившегося в это время в краевых участках кратона.

Глава 8. РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ГРАНИТОИДЫ - ОСНОВНЫЕ ИНДИКАТОРЫ РОСТА И ЭВОЛЮЦИИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА суммирует и обобщает данные первых глав диссертации. Прежде всего, обращается внимание на то, что гранитоидный магматизм является важным механизмом дифференциации коры, а его продукты являются индикаторами процессов становления и преобразования континентальной коры, изменяясь по мере возрастания «зрелости» коры от высококальциевых и низкокальциевых к высокощелочным гранитоидам. Автор анализирует изменения состава гранитоидов от этапа к этапу и восстанавливает картину формирования коры Сибирского кратона и его роста. На этом основании Т.В.Донская сделала вывод о двух этапах формирования континентальной коры кратона – в интервале 2.06 – 2.00 млрд лет, когда формировались островные дуги в обрамлении будущих составляющих кратона, и в интервале 1.88 – 1.84 млрд лет в связи с формированием Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса.

В главе 9. РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ГРАНИТОИДЫ - ИНДИКАТОРЫ СТАНОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА на основе полученных данных и заключений дана реконструкция последовательного формирования структурного

каркаса Сибирского кратона и охарактеризована палеогеодинамическая обстановка каждого из этапов магматизма.

Защищаемые положения и их обоснованность. Представленный в диссертации материал послужил основой для выдвижения шести защищаемых положений. Первое из них обосновывает выделение восьми этапов проявления гранитоидного магматизма в раннепротерозойской истории Сибири. Второе обосновывает связь этих этапов с важнейшими рубежами становления структуры континента. Третье фиксирует определенные различия в эволюции магматизма в различных частях кратона, связывая их с различиями в геологических условиях формирования. Четвертое детализирует третье положение для юго-восточной и юго-западной частей кратона и отражает конкретные тренды в развитии магматизма этих территорий. Пятое посвящено характеристике Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса и показывает, что составы пород пояса в разных его сегментах, с одной стороны, отражают состав их источников, а с другой, зависят от времени завершения коллизийных процессов в соответствующих районах. Шестое положение обосновывает выделение двух этапов роста континентальной коры, зафиксированных в раннепротерозойских структурах Сибирского кратона: первый в интервале 2.06 – 2.00 млрд лет, проявившийся в связи с формированием островных дуг в окрестностях зарождающегося кратона, второй в интервале 1.88 – 1.84 млрд лет при формировании Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса, для которого предполагается смешанный корово-мантийный источник. Все защищаемые положения обоснованы большим фактическим материалом, изложенным в главах диссертации, и не вызывают возражений. В той или иной форме они представлены в публикациях автора и прошли проверку геологическим сообществом.

Достоинства и недостатки диссертации. В целом, я оцениваю выполненную работу очень высоко. Ее результаты многоплановые. Прежде всего, хотелось бы отметить, что расшифрована достаточно подробная история формирования структуры Сибирского кратона. Показано, что это было не одномоментное событие, а целая серия последовательных актов, растянувшихся на достаточно продолжительное время. При этом каждый из них отвечал объединению разрозненных континентальных блоков в более крупные группировки и сопровождался проявлениями гранитоидного магматизма.

Расшифрована история раннепротерозойского гранитоидного магматизма, установлена его этапность и продемонстрирована связь этих этапов с крупными структурными событиями в истории формирования кратона. Впервые выполнено обобщение геохимических и изотопных характеристик гранитоидов, участвующих в формировании Сибирского континента на разных стадиях становления его структуры.

Показана индикаторная роль гранитоидов для расшифровки геодинамических режимов, участвовавших в формировании Сибирского кратона, но также показано, что геохимические характеристики гранитов определяются не только геодинамическими режимами, но также составом и временем формирования субстратов плавления. Большим положительным моментом стала демонстрация того факта, что на одни геохимические характеристики пород при расшифровке их геодинамической природы полагаться нельзя. Нужен комплекс геологических данных, определяющих геологическую ситуацию на момент проявления магматизма.

Необходимо отметить, что автореферат полностью соответствует тексту диссертации, в нем приводятся основные результаты, обосновывающие защищаемые положения.

Наряду с удовлетворением, полученным при знакомстве с этой работой, к ряду ее построений у меня возникли вопросы. Так, меня удивил отрыв гранитоидов от других проявлений магматизма, прежде всего базитового. Сам стиль изложения приводит к выводу, что все процессы формирования Сибирского кратона сопровождались главным образом гранитоидным магматизмом. Упоминания о магматизме основного состава редки, также как и оценки его роли в образовании гранитоидов. Все это противоречит моему опыту изучения гранитоидов, свидетельствующему, что с гранитами постоянно ассоциируют дайки, штоки, более ранние фазы пород основного состава. Их присутствие объясняет, по крайней мере, появление избыточного тепла, необходимого для плавления коры и появления гранитных расплавов. Если же их нет, то, как я полагаю, напрашивается интересный вывод о специфике раннепротерозойского магматизма, протекавшего без участия базитов. Соответственно было бы интересно узнать, является ли эта специфика присущей только Сибирскому кратону или же была свойственна также другим кратонам.

Мне осталось непонятным, по какому признаку автор диссертации определила, что островодужные граниты с возрастом 2.06 – 2.00 млрд лет участвовали в формировании коры Сибирского кратона, а граниты с возрастом 2.15 – 2.04 млрд лет не участвовали. И те и другие относятся к автономно развивавшимся структурам, сформированным до того, как возник кратон. Это хорошо видно и на приведенных в работе схемах, на которых показано, что до рубежа 2 млрд лет Сибирского кратона как единой структуры еще не существовало (например, рис. 9.3.). И те и другие сопровождались процессами формирования и преобразования континентальной коры (в разных масштабах), а сформированные ими коры стали теми кирпичами, которые сложили Сибирский кратон. Добавлю, что к становлению Сибирского кратона эти процессы имели опосредованное отношение.

Мне представляется, что в работе не до конца были рассмотрены варианты протекания корообразующих процессов. Граниты, возникшие в ходе сборки (коллизии) разных кратонных блоков в Сибирский континент, зафиксировали отсутствие новообразованной коры в источниках плавления. Эта ситуация довольно странная, так как возникает вопрос о судьбе той коры (окраинных и задуговых бассейнов, пассивных окраин), которая разделяла сталкивающиеся блоки. Механизм косой коллизии навряд ли применим ко всей совокупности блоков, составляющих Сибирский кратон. К тому же он должен сопровождаться комплексом специфических тектоно-магматических структур, в том числе типа pull-apart в обрамлении коллизионных швов, которые никак не проявились в структурах кратона. Полагаю, что в основном происходила нормальная коллизия. В этом случае отсутствие следов новообразованной коры на границах блоков следовало бы связать с эрозией континентальной коры при частичной ее субдукции в результате «жесткой» коллизии.

Некоторые характеристики Южно-Байкальского пояса оказались разноречивыми. С одной стороны он характеризуется как постколлизионный. Пояс прослеживается через все основные тектонические структуры южной части Сибири, зафиксировав тем самым их объединение в это время в единый Сибирский кратон. С другой стороны, отмечается, что гранитоиды ряда участков этого пояса возникли в коллизионной геодинамической обстановке, возникшей при *объединении континентальных блоков и террейнов разной природы в единую структуру (цитата из работы)*. О какой коллизии и каких блоках здесь идет речь, и какова истинная природа пояса я так и не понял.

Сделанные замечания и поставленные вопросы ни в коей мере не умаляют ценность и значимость проведенного исследования. Результаты, полученные Татьяной Владимировны Донской, являются важным вкладом в геологическую науку. Прежде всего, это замечательная сводка, в которой сведены все новейшие данные по геохронологии, геохимии и изотопному составу раннепротерозойских гранитоидов Сибирского кратона. Важным аспектом работы стало обоснование этапности проявления гранитоидного магматизма и его корреляции со структурообразующими процессами. Значительную ценность представляют реконструкции истории становления структуры Сибирского кратона. Впервые столь определенно было показано, что этот процесс был растянут во времени. В плане глобальных корреляций он свидетельствует о том, что в интервале 2.0 – 1.85 млрд лет на Земле действовала геодинамическая обстановка, сгонявшая рассеянные кратонные блоки в более крупные кратоны, вплоть до формирования суперконтинента Колумбия.

Заключение. Все выше сказанное позволяет мне заявить, что диссертация Татьяны Владимировны Донской является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований внесет важный вклад в решение научной проблемы, имеющей фундаментальное значение для геологии, и раскрывающая особенности структурной и магматической эволюции древних кратонов в процессе их сборки в более крупные континенты. Полученные ей результаты помогают понять, как формировалась земная кора и как протекали геологические процессы при формировании первых суперконтинентов. Эти результаты важны для фундаментальной науки и имеют определенные практические приложения, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Поэтому я считаю, что автор диссертации, Татьяна Владимировна Донская, без всякого сомнения заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Доктор геолого-минералогических наук,
академик,
заведующий Лабораторией редкометального
магматизма ИГЕМ РАН

 В.В. Ярмолюк

119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35,
Федеральное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных
месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
+74992308229, yarm@igem.ru

Дата 15.09.2019

