

На правах рукописи

РОМАНОВА Ирина Валерьевна

**ГЕОХИМИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ
ЩЕЛОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА**

25.00.09 - Геохимия, геохимические методы поиска полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук



Иркутск 2013

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН и в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: **Шацкий Владислав Станиславович**,
член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Официальные оппоненты: **Антипин Виктор Сергеевич**,
доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, главный научный сотрудник
Дорошкевич Анна Геннадьевна,
кандидат геолого-минералогических наук, Геологический институт СО РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)

Защита диссертации состоится **18 июня 2013 г. в 9-00** на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Институте геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, д. 1а, Иркутск, 664033, факс (3952)427050, e-mail: korol@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института

Автореферат разослан 13 мая 2013г.



Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

Г.П.Королева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В мировой геологической литературе интерес к щелочным породам обусловлен их экзотическим минеральным составом, петрографическим разнообразием, сложностью проблем петрогенезиса, возникающих при их изучении, и нередко ассоциацией с редкометальным оруденением (Sorensen, 1974; Магматические горные..., 1984; Mitchell, 1996). Обладая крайне широкими вариациями минералогических и химических характеристик, щелочные породы представляют собой экстремальные продукты дифференциации, и, поэтому их изучение необходимо для понимания образования всех других магматических пород (Kogarko et al., 1995). Геохимические характеристики щелочных комплексов также важны для изучения мантийных источников глубинных пород (Когарко, Хаин, 2001; Marikiyo et al., 2001; Campbell, 2007) и при реконструкциях разных геодинамических обстановок их формирования (Wilson, Downes, 1991; Bonin, 1998; Ярмолюк и др., 2000; 2005; Кузьмин и др., 2011). В генетической связи со щелочными породами находятся крупнейшие, часто уникальные месторождения полезных ископаемых – руд фосфора, алюминия и ряда дефицитных редких элементов - ниобия, тантала, редких земель, бериллия, урана, циркония и др. (Semenov, 1974; Шацкий, 1975; Кононова, 1976; Sorensen, 1992; Вильямс, Когарко, 1996; Dobretsov, Vernikovskiy, 2001; Schissel, Smail, 2001; Pirajno, 2007). Актуальность исследования разнообразных щелочных пород Енисейского кряжа, представляющего собой аккреционно-коллизийную структуру в западном обрамлении Сибирского кратона, продиктована необходимостью выявления особенностей их минерального и геохимического состава, возраста и условий формирования.

Целью работы является минералого-геохимический анализ щелочных и ассоциирующих с ними магматических пород, выяснение условий и возраста их образования в структуре Енисейского кряжа (на примере Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского массивов).

Основные задачи исследования, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Провести минералого-геохимическую типизацию основных типов пород трех исследуемых щелочных массивов Енисейского кряжа.
2. На основании результатов изотопно-геохимического изучения обогащенных щелочами магматических пород установить их магматические источники.
3. Провести анализ полученных геохронологических данных для щелочных и ассоциирующих с ними магматических пород Енисейского кряжа и установить основные геохимические критерии отнесения их к разным геодинамическим комплексам.

Объектами исследований в работе являются Среднетатарский, Ягодкинский и Порожинский щелочные массивы, отличающиеся породными ассоциациями. Многие вопросы, связанные с магматическими источниками, возрастом и обстановками их формирования, оставались неясными до настоящего времени. Изучением щелочных и ассоциирующих с ними пород этих массивов Енисейского кряжа геологи занимались с начала XX века, связанным главным

образом с геолого-съёмочными работами и исследованием на предмет редкометальности. Среднетатарский массив сложен преимущественно нефелиновыми сиенитами и ийолитами и отличается богатой редкометальной минерализацией. Минералого-петрографические и геохимические особенности пород массива (по валовым химическим анализам) приведены в работах Е.В. Свешниковой с соавторами (1965; 1966; 1976), а изотопно-геохимические (Rb-Sr и Sm-Nd) – в работах (Сазонов и др., 2007; Федорова, 2011). Ягодкинский массив слагают мелкие штокообразные тела щелочных пород (Кузнецов, 1941; Кренделев, 1971), которые прорывают неопротерозойский гранитоидный массив. Порожинский массив представляет собой вулкано-тектоническую постройку, сложенную большим разнообразием интрузивных и вулканических пород (Даценко, 1974; 1984). Для пород Ягодкинского и Порожинского массивов детальных минералогических и геохимических исследований до настоящего времени не проводилось.

Геохимическое и геохронологическое изучение щелочных и ассоциирующих с ними разнообразных магматических пород невозможно без их минералого-петрографической оценки. Новые детальные минералого-петрографические исследования (с использованием современных методов) необходимы для установления минеральных химических составов, исследований процессов роста (в том числе зональности) минеральных фаз, взаимоотношений минералов и последовательностей их кристаллизации, и, наконец, выявления геохимической *эволюции магм и флюидов* изучаемых разновозрастных массивов.

Фактический материал и методы исследований. В основу диссертационной работы положены результаты исследований, выполненные лично автором и совместно с сотрудниками лабораторий ИГМ и ИНГГ СО РАН в период 2005-2012 гг. В работе использованы образцы, отобранные в ходе геологических экспедиций лаборатории геодинамики и палеомагнетизма ИНГГ СО РАН, в том числе с участием автора, а также геологические материалы (схемы, шлифы, образцы), любезно предоставленные к.г.-м.н. В.М. Даценко (КНИИГИМС, г. Красноярск). Работа базируется на петрографических описаниях коллекции шлифов щелочных и субщелочных пород Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского массивов (73), с использованием оптической (Nikon ECLIPSE LV100POL) и электронной микроскопии (JEOL JSM-6380LA, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), на микронзондовых (525), рентгенофазовых (1), петрохимических (РФА – 17), геохимических (ICP-MS – 17), изотопно-геохимических (Sm-Nd – 7 и Rb-Sr – 5) и геохронологических (U-Pb – 4 и Ar-Ar – 1) анализах. Химический анализ минералов определялся на рентгеноспектральных микроанализаторах (САМЕВАХ-Micro и JXA-8100, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), исследования методом рентгеновской дифракции были проведены с использованием дифрактометра ДРОН-УМ (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Определение содержания главных элементов в породах выполнено рентгенофлуоресцентным методом (ИГХ СО РАН, г. Иркутск и ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), рассеянных элементов – методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS) на приборах ELEMENT2 (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) и ELEMENT (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Изотопно-геохимические исследования (Sm-Nd,

Rb-Sr) были проведены с использованием 7-коллекторного масс-спектрометра Triton TI (ВСЕГЕИ, г. С. Петербург). При датировании сфена U-Pb изотопным методом использовался многоколлекторный масс-спектрометр Finnigan MAT-261 (ИГГД РАН, г. С. Петербург), для датирования единичных зерен цирконов – ионный микроанализатор SHRIMP II (ВСЕГЕИ, г. С. Петербург). Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Защищаемые положения:

1. Породы Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского массивов Енисейского кряжа принадлежат к щелочной магматической серии, представляя как недосыщенные, так и насыщенные SiO_2 , большинство с преобладанием Na_2O относительно K_2O , металломиневые, железистые разности. Высокое содержание рассеянных, особенно, высокозарядных элементов (Th, U, Ta, Nb, Hf, Zr), вероятно, связано с присутствием недеплетированного мантийного материала в магматических источниках этих пород. Магматическая эволюция сопровождалась фракционной кристаллизацией (Ba, Sr, Eu, P, Ti), уменьшением кальциевости и увеличением щелочности по направлению к щелочным дифференциатам.
2. Эволюция щелочной магмы Среднетатарского массива, вслед за формированием ийолитов, была разделена на два эволюционных тренда. Первый привел к формированию щелочных дифференциатов – агаитовых фойяитов, с последующим эволюционированием до фойяит-пегматитов с Nb, PЗЭ-минерализацией при участии F-Cl насыщенных флюидов. Магма второго тренда, менее насыщенная флюидами, привела к образованию миаскитовых фойяитов и щелочных сиенитов.
3. Щелочные и ассоциирующие с ними разнообразные магматические породы Татарско-Ишимбинской тектонической зоны Енисейского кряжа, включая карбонатиты и граниты А-типа, характеризуются ниобиевой специализацией. Они сформировались 725–630 млн. лет назад из магмы мантийного и мантийно-корового источников, в обстановке тыловых зон растяжения активной континентальной окраины, синхронно с субдукционными комплексами Приенисейской зоны.
4. Порожинский щелочной массив, расположенный в Приенисейской тектонической зоне Енисейского кряжа, сформировался при смешении мантийных источников EM-1, EM-II и DMM, с преобладанием последнего. О многократном поступлении нового мантийного материала свидетельствуют сложные тренды составов пироксенов и амфиболов этого массива, выраженные Fe-Mg зональностью. Образование этих пород около 240 млн. лет назад происходило в анорогенной обстановке, одновременно с внедрением сибирских траппов, подобно другим малым массивам повышенной щелочности западной окраины Сибирского кратона.

Научная новизна работы. В результате выполненных исследований получены новые знания об особенностях минералогического и геохимического составов, возрасте и условиях формирования щелочных пород в пределах аккреционно-коллизонной структуры Енисейского кряжа.

1. Автором впервые выполнен комплексный минералого-химический анализ породообразующих и аксессуарных минералов щелочных и субщелочных пород из рассматриваемых массивов современными прецизионными методами, что позволило установить композиционную эволюцию минеральных фаз и последовательность кристаллизации минералов, и, как результат, проследить геохимическую эволюцию щелочных магм разных геодинамических комплексов. Было установлено, что эволюция щелочной магмы Среднетатарского массива, вслед за формированием ийолитов, была разделена на два эволюционных тренда, приведших к формированию агапитовых и миаскитовых разностей пород. Установлены и изучены новые разновидности пород, слагающих Ягодкинский массив (кварцевые сиениты, щелочнополевошпатовые сиениты и трахибазальты).

2. Автором выполнена геохимическая типизация и установлена мантийная природа щелочных пород, основываясь на изучении и анализе фактического материала по трем щелочным массивам, обработанного с использованием геохимических (ICP-MS метод) и изотопно-геохимических данных (Sm-Nd и Rb-Sr методы). Их формирование возможно происходило при неоднократном поступлении мантийных расплавов в магматическую камеру (обогащенного и деплетированного мантийного материала), при разном вкладе древнего континентального корового вещества.

3. Впервые получены U-Pb геохронологические данные по цирконам для всех изученных щелочных массивов и также по сфену для Среднетатарского массива. Показано, что щелочные породы Среднетатарского и Ягодкинского массивов были сформированы в позднем неопротерозое, а Порожинского – в раннем-среднем триасе.

4. Установлено, что исследуемые щелочные и субщелочные породы Татарско-Ишимбинской и Приенисейской сутурных зон Енисейского кряжа имеют большое сходство геохимических параметров (особо выделяется ниобиевая геохимическая специализация пород первой зоны) и отчетливые различия геохронологических (два возрастных этапа), минералогических (разнообразие ассоциаций) и изотопно-геохимических (разнообразие магматических источников) критериев, что характеризует разные геодинамические условия формирования двух магматических комплексов – неопротерозойского активной континентальной окраины и мезозойского анорогенного.

Практическая значимость работы. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при доработке и совершенствовании государственных геологических карт, при геолого-съёмочных работах, а также для дополнения учебных студенческих курсов по петрографии, петрологии и геохимии щелочных магматических пород.

Апробация работы, стажировки и публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах. Основные результаты работы докладывались на международных и российских конференциях: 17-й конференции «Goldschmidt», Кельн, Германия, 2007 г.; Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 2007–2009 гг.; конференциях «Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды», Иркутск, 2007 г.; «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2008 г.; «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского

подвижного пояса (от океана к континенту)», Иркутск, 2009 г.; конференции-школе «Щелочной магматизм Земли», Москва–Крым, 2010 г.; конференции «Граниты и процессы рудообразования», Москва, 2011 г.; 34-м Международном геологическом конгрессе, Брисбен, Австралия, 2012 г.

Во время обучения в бакалавриате НГУ (2006 г.) автор проходила стажировку в ИГГД РАН (г. С.-Петербург) по изотопно-геохимическим методам геохронологических исследований и минеральной сепарации цирконов под руководством д.г.-м.н. А.Б. Котова. Во время обучения в магистратуре НГУ автор участвовала в геологической экскурсии по изучению щелочных пород рифта Осло (2008 г.), а затем, в течение трех месяцев стажировалась в Уппсальском университете (Швеция) под руководством профессора Д. Джи, где она проводила минералого-петрографические исследования метаморфических пород Скандинавских каледонид. Во время прохождения аспирантуры (2011-2012 гг.) автор работала по международному проекту по изучению поднятия Шатского, где под руководством доктора наук Д. Мерфи (Технологический Университет Квинсланда, Австралия) проводила геохимические (РФА, ICP-MS) и изотопно-геохимические исследования, включая химическую подготовку образцов в «чистой» радиогенной изотопной лаборатории с последующим измерением на: 1) ICP MS; 2) MC-ICP-MS для изотопного анализа Pb и Nd; 3) TIMS для измерения изотопного Sr.

Объем и структура работы. Квалификационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 229 страниц текста, включая 25 рисунков, 109 фотографий, 62 карты с распределением элементов и 2 приложения из 20 таблиц. Список литературы включает 328 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю и учителю чл.-корр. РАН, проф. В.С. Шацкому за ценные консультации, критические замечания и постоянную поддержку в период подготовки настоящей диссертационной работы. Автор благодарна своим родителям и учителям – д.г.-м.н. А.Е. Верниковской и чл.-корр. РАН, проф. В.А. Верниковскому за их постоянную поддержку, помощь в выборе интересного объекта изучения и оказанную возможность участия в геологических экспедициях на Енисейский кряж. Автор признательна академикам РАН: Н.Л. Добрецову, Е.И. Гордееву, Л.Н. Когарко, М.И. Кузьмину, В.В. Ярмолуку; чл.-корр. РАН: И.В. Гордиенко, Н.А. Горячеву, Е.В. Склярову; д.г.-м.н., проф. Г.Н. Аношину; д.г.-м.н. Д.А. Зедгенизову; к.г.-м.н.: А.Л. Рагозину, В.В. Шарыгину за ценные консультации и советы. Автор благодарна д.г.-м.н. Э.В. Сокол за помощь в освоении методов электронной микроскопии, рентгенофазового и микрозондового анализов; О.С. Хмельниковой и к.г.-м.н. В.Н. Королуку за консультации при проведении микрозондового анализа; д.г.-м.н. А.Б. Котову, к.г.-м.н.: Е.Б. Сальниковой, В.П. Ковачу, С.З. Яковлевой, Н.Г. Бережной, А.Н. Ларионову за консультации и помощь в ознакомлении с методами геохронологических исследований; д.г.-м.н. Э.П. Солотчиной и к.г.-м.н.: А.В. Травину, И.В. Николаевой, С.В. Палескому, Н.А. Пальчик за проведенные геохимические исследования; к.г.-м.н.: А.Т. Титову, Н.С. Карманову и С.В. Летову за помощь в работе со сканирующей электронной микроскопией. Автор выражает

глубокую признательность за ознакомление с изотопными геохимическими методами докторам: Д. Мерфи, С. Брайан, Ю. Фонг, В. Хю, И. Кинаев, Австралия. Автор хранит самые теплые воспоминания о совместных полевых исследованиях и благодарит за хорошую полевую школу и за предоставленный каменный материал к.г.-м.н.: В.М. Даценко, Ю.А. Забирова и геологов Б.Б. Сакович и Л.П. Сакович. Автор искренне благодарит за советы, консультации, совместные полевые исследования д.г.-м.н.: С.Б. Бортникову, О.Л. Гаськову, А.Ю. Казанского, Д.В. Метелкина; к.г.-м.н.: Ю.К. Советова, Б.А. Натальина, а также ученых из Швеции: проф. Д. Джи; докторов: Н. Лебедева-Иванову, А. Ладенбергер, Я. Майка; докторов из Австралии: Ж.К. Ли, С.А. Уайлд, М.Т.Д Вингейт. Автор благодарна за дружескую поддержку, совместные экспедиционные работы, за неоценимую помощь при обработке каменного материала и подготовке графического материала своим соавторам к.г.-м.н.: Н.Ю. Матушкину и А.М. Ясеневу, а также И.В. Веялко и Е.В. Гуляевой. Автор выражает свою глубокую признательность всем своим учителям – преподавателям НГУ, особенно, д.г.-м.н., проф. Г.Ю. Шведенкову, д.г.-м.н. Г.Г. Лепезину, к.-г.-м.н.: Е.Н. Ушаковой, Н.А. Кулик, С.З. Смирнову, Л.М. Житовой, В.И. Гаврилову. Автор благодарна своему мужу М.И. Романову за неоценимую поддержку и понимание в период подготовки работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Щелочные породы: геохимическая классификация, существующие представления о генезисе и геодинамические обстановки их формирования.

Первая глава посвящена обзору современного состояния знаний в области щелочных пород. Показано, что щелочные магматические породы установлены как на континентах, так и океанических островах – известно более 2000 массивов (исключая кимберлиты), большую часть которых отличает небольшая площадь проявлений – 50-100 км² (Kogarko et al., 1995; Антипин, Макрыгина, 2006; Glossary of geology, 2005). Вероятно, что щелочной магматизм на Земле появился в позднем архее, на рубеже 2.5–2.7 млрд. лет, и его активность неуклонно возрастала, особенно начиная с позднего неопротерозоя (Когарко, Хаин, 2001).

В главе обсуждаются терминологические особенности в петрологии щелочных пород, критерии минералого-геохимической типизации и геохимические классификации. В частности, ряд классификаций, например, А.Е. Ферсмана, который в 1929 году предложил разделение нефелиновых сиенитов на агапитовую и миаскитовую группы, используя молекулярное отношение $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ – индекс агапитности. Эти две главные парагенетические группы характеризуются разным порядком кристаллизации минералов (Fersman, 1929). Главной отличительной чертой агапитовых пород от миаскитовых является присутствие сложных Zr- и Ti-силикатов, таких как эвдиалит, а не “простых” минералов – циркона и ильменита (Sorensen, 1974; Le Maitre, 2002). В классификации Х. Соренсена (Sorensen, 1960; 1974) критерием для выделения щелочных пород явилось присутствие фельдшпатоидов (нефелина, лейцита, мелилита и др.) и (или) щелочных пироксенов и амфиболов. В рекомендациях Международного союза

геологических наук по классификации магматических пород предлагается относить к щелочным породам, кроме того, породы с нормативными фельдшпатоидами или акмитом (Le Maitre, 2002). В работе рассматривается ряд диаграмм и индексов, используемых для классификаций щелочных пород, например, известково-щелочной индекс, введенный Пикоком для вулканических пород (Peacock, 1931); модифицированный щелочно-известковый индекс для интрузивных пород (Frost et al., 2001); индекс Fe^* ($FeO/FeO+MgO$), согласно (Frost et al., 2001; Frost, Frost, 2008) и др.

Анализ литературных данных показывает, что большинство пород, принадлежащих к щелочной магматической серии, являются металлюминиевыми, перщелочными или, реже, слабо пераллюминиевыми. Наиболее железистые породы образуются дифференциацией или частичным плавлением в восстановленных и относительно сухих условиях базальтовых родителей. Конечные дифференциаты таких расплавов – фаялитовые граниты, щелочные граниты и нефелиновые сиениты. Эти породы формируются во внутриплитных условиях (intraplate settings), большинство на континентах, хотя возможно их образование из эволюционировавших магм океанских островов и в обстановке активной континентальной окраины. К пониманию природы щелочного магматизма приближает нас изучение продуктов магматизма, связанного с современными и древними мантйными плюмами, в том числе в пределах Больших Магматических Провинций (LIP). Одним из наиболее сложных вопросов является установление магматических источников и идентификация геодинамических обстановок формирования древних (особенно докембрийских) щелочных пород, включая ассоциирующие с ними граниты, карбонатиты и другие разнообразные магматические породы (Bonin, 1998; Woolley, 2001 и др.).

Глава 2. Геологическое и геодинамическое положение щелочных комплексов Енисейского кряжа.

Енисейский кряж представляет собой складчато-покровный пояс, расположенный в юго-западном обрамлении Сибирской платформы (рис. 1). Пояс вытянут в СЗ-ЮВ направлении вдоль р. Енисей более чем на 650 км, его ширина варьирует от 50 до почти 200 км. Имеющиеся геологические данные многолетних геолого-съёмочных работ по государственному геологическому картированию, тематических и научно-исследовательских работ, в том числе результаты геолого-структурных и петрологических исследований, полученные на основе плитотектонического анализа, свидетельствуют о том, что Енисейский кряж представляет собой неопротерозойский аккреционный пояс (Зоненшайн и др., 1990; Волобуев, 1993; Vernikovskiy et al., 1993; 2003; и др.). По мнению многих авторов, в ранне-неопротерозойское время западная и северная части Сибирского кратона были окружены океанами и островодужными системами (Khain et al., 1997; Верниковский и др., 1999; 2009; Метелкин и др., 2007; Li et al., 2008; Pisarevskiy et al., 2008), что подтверждается палеомагнитными данными и палеогеодинамическими реконструкциями. Именно в западной части Сибирского кратона в среднем неопротерозе в обстановке активной континентальной окраины началось зарождение Енисейского кряжа.

В состав коллизивно-аккреционной структуры Енисейского кряжа входят террейны различной природы и возраста (рис. 1): островодужные, с офиолитовыми аллохтонами (Привидинский и Исаковский), пассивной континентальной окраины (Восточно-Ангарский), гранитно-метаморфические (Ангаро-Канский и Центрально-Ангарский). Тектоническими границами террейнов являются субпараллельные крупнейшие сутурные зоны северо-западного и субмеридионального простирания – Татарско-Ишимбинская и Приенисейская, сложенные системами разломов преимущественно взбросо-надвиговой кинематики (Верниковский, Верниковская, 2006; Матушкин, 2010).

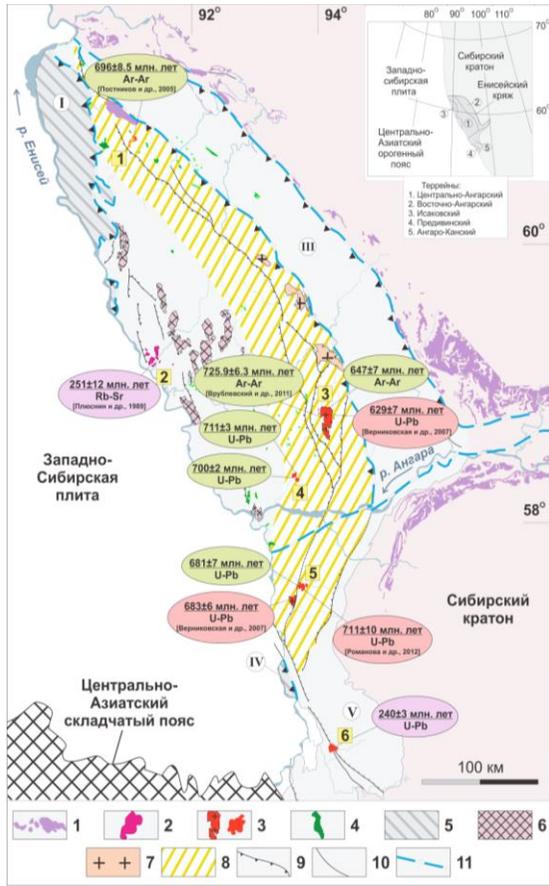


Рис. 1. Геолого-тектоническая схема Енисейского кряжа и положение массивов щелочных пород с использованием (Кренделев, 1971; Качевский и др., 1998; Vernikovskiy et al., 2003; Качевский и Зуев, 2005). 1-2: породы, образование которых связывается с Сибирским плюмом (T₁); 1 – траппы; 2 – щелочные и нефелиновые сиениты, щелочные трахиты и карбонатиты; 3-7: неопротерозойские магматические комплексы: 3 – татарский щелочных и ассоциирующих с ними пород, включая захребетнинский щелочных и нефелиновых сиенитов, трахитов и пенчингинский карбонатитовый (~725-629 млн. лет); 4 – массивы щелочных и субщелочных пород (NP[?]); 5 – приенисейский офиолитовый островодужный (697-628 млн. лет); 6 – глушихинский постколлиззионный с лейкогранитами (750-720 млн. лет); 7 – аячтинский коллиззионный с гранитами (760-750 млн. лет); 8 – Татарско-Ишимбинская сутурная зона; 9 – надвиги; 10 – разломы; 11 – границы

террейнов. Цифрами в квадратах обозначены массивы: 1 – Захребетнинский, 2 – Кийский, 3 – Татарский, 4 – Среднетатарский, 5 – Ягодкинский, 6 – Порожинский. Возрастные данные на зеленом фоне соответствуют неопротерозойским щелочным породам, на сиреновом – триасовым щелочным породам, на розовом – неопротерозойским гранитоидам.

Татарско-Ишимбинская тектоническая зона, протяженностью около 500 км, имеет преимущественно СЗ простирание и является восточной сутурой, разделяющей Центрально-Ангарский и Восточно-Ангарский террейны. Приенсейская сутура составляет наиболее протяженную тектоническую зону Енисейского кряжа, является его западной краевой сутурой и одновременно восточной границей зоны сочленения Западно-Сибирской плиты с Сибирским кратоном. Она представлена сложной системой надвигов СЗ и субмеридионального простирания, по которым в позднем неопротерозе Исаковский и Предивинский островодужные террейны были обдуцированы на окраину Сибирского кратона.

Щелочные и ассоциирующие с ними разнообразные магматические породы, размещенные в Татарско-Ишимбинской зоне, выделяются в пределах разных комплексов и массивов (рис. 1). Среди них (с севера на юг) в заангарской части – захребетнинский, пенчегинский карбонатитовый комплексы и Среднетатарский массив, а в Южно-Енисейском кряже – Ягодкинский массив. В последнее время они были объединены в татарский комплекс и было высказано предположение об их образовании в обстановке активной континентальной окраины в позднем неопротерозе (Верниковский и др., 2008). Неясная структурная позиция не позволяла отнести Порожинский щелочной массив, находящийся в южной части Южно-Енисейского кряжа, к той или иной сутурной зоне, что объясняется, как будет показано ниже, анорогенной обстановкой и синхронностью его формирования с сибирскими траппами. Согласно литературным данным, к этому же событию можно отнести образование нефелиновых сиенитов, щелочных сиенитов, уртитов, якупирангитов и ийолитов Кийского массива в Заангарской части Енисейского кряжа, с Rb-Sr изохронным возрастом 251 ± 12 млн. лет, согласно исследованиям Г.С. Плюснина с соавторами.

Глава 3. Минералогия и петрография щелочных и ассоциирующих с ними пород Татарско-Ишимбинской зоны Енисейского кряжа.

В главе приводятся данные по минералогии Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского массивов, которые показывают, что массивы характеризуется широким разнообразием и уникальностью минеральных составов, что было подтверждено в работе впервые полученными анализами с использованием микронзондового, рентгенофазового методов исследований и электронной микроскопии. Для этих массивов минералогическим анализом установлено, что эволюция щелочной магмы сопровождалась уменьшением кальциевости и магнезиальности и увеличением железистости и щелочности по направлению к щелочным дифференциатам. В частности, показано, что состав щелочного пироксена из полевошпатовых ийолитов к щелочным сиенитам и фойяитам Среднетатарского массива меняется от *эгирина-авгита* к *эгирину* (рис. 2). В этих породах установлены высокожелезистые минералы: биотит состава аннит (65-70 %) – сидерофиллит (25-30 %) – флогопит (~ 5 %) и астрофиллит; Fe присутствует в виде примеси во всех изученных породообразующих (нефелине, полевых шпатах) и аксессуарных (сфене, эвдиалите, ниобатах) минералах. Для фойяитов, доминирующих пород Среднетатарского массива, характерен следующий порядок кристаллизации: *сфен* – *Na-Fe-силикаты* (*эгирин*, *арфведсонит*) – *астрофиллит* – *биотит* – *нефелин* – *микроклин* – *Zr-Ti*

силикатные минералы (паракелдышит, эвдиалит) – анальцит – ниобаты – F-насыщенные фазы (флюорит, флюоцерит).

В Ягодкинском щелочном массиве представлена щелочно-субщелочная ассоциация интрузивных и вулканических пород со следующим изменением состава мафических минералов: в субщелочных основных вулканитах (трахибазальтах) присутствуют Ca-Mg-пироксены (авгит-диопсид), Ca-амфиболы (Mg роговая обманка, эденит) и биотиты состава аннит (50-40 %) – флогопит (30-35 %) – сидерофиллит (15-30 %); в интрузивных средних и кислых породах (щелочнополевошпатовых сиенитах, кварцевых сиенитах) установлены Ca-Fe-пироксены (авгит-геденбергит), Ca-амфиболы (ферроэденит-гастингсит, грюнерит) и биотиты состава аннит (70-85 %) – сидерофиллит (5-25 %) – флогопит (~ 5 %); в щелочных сиенитах, по данным Ю.А. Кузнецова (1988), присутствуют Na-пироксен (эгирин-авгит) и Na-амфибол (рибекит). Геденбергит и грюнерит являются редкими минералами кварцевых сиенитов, в отличие от более характерных для таких пород магнезиальных разновидностей (Магматические горные..., 1985), что является особенностью этого массива.

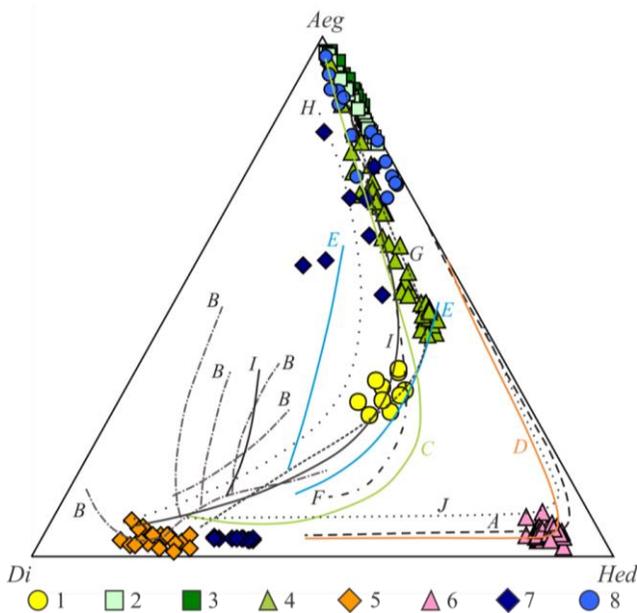


Рис. 2. Состав пироксенов из пород Среднетатарского (1-4), Ягодкинского (5-6) и Порожинского (7-8) массивов по классификации (Morimoto, 1988) в сравнении с композиционными трендами пироксенов из щелочных пород других комплексов (А-Ж): 1 – ийолиты; 2 – фойяит-пегматиты; 3 – фойяиты; 4 – щелочные сиениты; 5 – трахибазальты; 6 – кварцевые сиениты; 7 – щелочные трахиты; 8 – щелочные сиениты; А – Иллимассаг, S.Greenland (Larsen, 1976); В – Fen, Norway (Mitchell, 1980); С –

South Qoroq, S. Greenland (Stephenson, 1972); D – Coldwell, Canada (Mitchell and Platt, 1978); E – Alno, Sweden (Vuorinen et al., 2005); F – Gronnedal-Ika, S. Greenland (Halama et al., 2005); G – Morotu, Sakhalin (Yagi, 1953); H – Eastern Uganda (Tyler and King, 1967); I – Iron Hill, Colorado (Nash, 1972); J – Nandewar, Australia (Abbott, 1969).

В щелочных трахитах Порожинского массива состав пироксенов меняется от *авгита* до *эгирина*, амфиболов – от Na-Ca-амфиболов (*рихтерит*, *катофорит*) до Na-амфиболов (*магнезиоарфведсонита*), железистость биотита варьирует от 0.28 до 0.65. В щелочных сиенитах Порожинского массива обнаружены более железистые и щелочные разновидности мафических минералов: пироксенов (*эгирина-авгит*, *эгирина*), Na-Ca-амфиболов (*ферровинчита*, *феррорихтерита*, *катофорита*), Na-амфиболов (*рибекита*, *арфведсонита*), железистость биотита повышается до 0.71. В изученных породах Порожинского массива амфиболы часто зональны – Ca-Na амфиболы обрастают каемкой Na-амфибола, в то время как в биотитах установлен тетраферрифлогопитовый компонент (часть Al заменена на Fe³⁺). В этих породах, кроме того, установлены более сложные тренды составов пироксенов и амфиболов, выраженные Fe-Mg зональностью этих минералов, что может быть связано с поступлением нового мантийного материала на ранних этапах образования этих пород.

Глава 4. Геохимия и геохронология субщелочных и щелочных пород Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского массивов.

Концентрации главных химических элементов в исследуемых породах Среднетатарского, Ягодкинского и Порожинского щелочных массивов отражают их широкое минералогическое разнообразие. Исследуемые породы относятся к щелочному и субщелочному рядам, и отвечают полям основных фойдолитов, фельдшпатоидных и щелочных сиенитов, щелочных трахитов, кварцевых сиенитов согласно химической классификации (Магматические горные..., 1983; 1985), применяемой в этой работе. Менее дробная химическая классификация по (Middlemost, 1994) позволяет отнести их к фойдолитам, фойд-сиенитам, сиенитам и кварцевым монцонитам. На обогащенную щелочами направленность указывает их положение в поле щелочной магматической серии на диаграмме Na₂O+K₂O-CaO (MALI) – SiO₂ (Рис. 3). Наибольшее содержание щелочей (K₂O+Na₂O) устанавливается в породах Среднетатарского массива (12.37–14.03 мас. %), с вариациями содержаний SiO₂ от 51.21 до 64.53 мас. % и преобладанием Na₂O над K₂O (Na₂O/K₂O = 1.2–2.4). Менее высокая концентрация щелочей наблюдается в породах Порожинского массива (11.71–12.41 мас. %), как и значений отношения Na₂O/K₂O (1.06–1.23) с небольшим разбросом концентраций SiO₂ (62.44–64.18 мас. %). Для пород Ягодкинского массива характерны близкие к породам Порожинского массива содержания щелочей (11.27–12.02 мас. %), но с более широким разбросом значений Na₂O/K₂O (0.7–2.3) и повышенными концентрациями SiO₂ (61.85–66.82 мас. %). В породах Среднетатарского массива, помимо Na₂O, устанавливаются наиболее высокие содержания Al₂O₃ и P₂O₅. Это находит свое отражение в их минералогических особенностях – высоких содержаниях щелочного полевого шпата, нефелина и присутствием апатита. Большинство исследуемых пород, согласно диаграмме по (Frost, Frost, 2008) являются железистыми (исключая трахибазальты, относящиеся к магнезиальным), металюминиевыми, реже субалюминиевыми (переходные к пералюминиевым).

В нефелиновых сиенитах коэффициент агапитности ($K_a = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$, молекулярные количества) варьирует от 0.86 до 0.92, соответствуя миаскитовому или переходному агапит-миаскитовому ряду. Как показано в гл. 3,

некоторые нефелиновые сиениты содержат *циркон*, что определяет их как миаскитовые разности (Sorensen, 1974; Le Maitre, 2002). Другие фоййиты Среднетатарского массива характеризуются наличием безглиноземистых силикатов (эвдиалит, канкринит, Ti-Zr-Nb-дисиликаты), что указывает на преодоление агпайтового «барьера». Изменение первоначального состава, приведшее к понижению коэффициента агпайтности, могло произойти вследствие выноса щелочей, наблюдаемого при вторичных процессах – интенсивного замещения нефелина. В пегматите нефелинового сиенита с большим количеством эвдиалита коэффициент агпайтности повышается до 1.09. На основании минералогического изучения щелочных пород Среднетатарского массива, включая последовательность кристаллизации минеральных фаз, сделан вывод о разделении эволюции щелочной магмы на два тренда. Первый привел к формированию щелочных дифференциатов – агпайтовых фоййитов, с последующим эволюционированием до фоййит-пегматитов с Nb, PЗЭ-минерализацией при участии F-Cl насыщенных флюидов. Обогащение Nb, PЗЭ, F и другими элементами нефелиновых сиенитов можно связать с процессами сепарации летучих компонентов и кристаллизационной дифференциации на стадиях формирования агпайтовых магм (Kogarko, 1990). Магма второго тренда, менее насыщенная юдами, привела к образованию миаскитовых фоййитов и щелочных сиенитов.

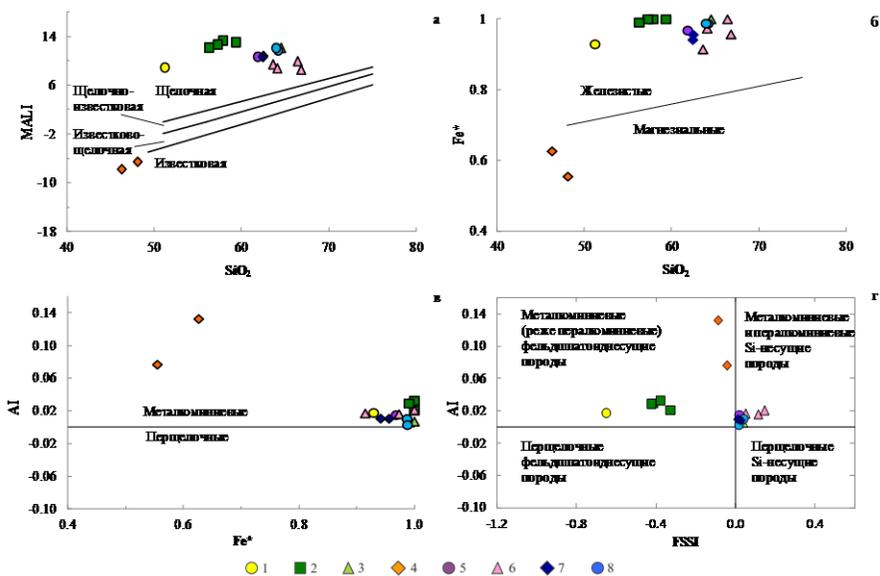


Рис. 3. Диаграммы MALI – SiO₂ (а), Fe* – SiO₂ (б), Al (=Al-[K+Na]) – Fe* (в), Al – FSSI (г), по (Frost, Frost, 2008), мас. %, для пород Среднетатарского (1-3), Ягодкинского (4-6) и Порожинского массивов (7-8): 1 – ийолиты; 2 – фоййиты; 3 – щелочные сиениты; 4 – трахибазальты; 5 – щелочнополевшпатовые сиениты; 6 – кварцевые сиениты; 7 – щелочные трахиты; 8 – щелочные сиениты.

Для субщелочных пород Ягодкинского, исключая трахибазальты, и щелочных пород Порожинского и Среднетатарского массивов характерны высокие значения суммы РЗЭ, варьирующие соответственно в интервалах 155–587 и 123–362 г/т. Максимальные их значения устанавливаются в кварцевых сиенитах, в которых также проявлены наиболее низкие отрицательные аномалии Eu ($Eu/Eu^* = 0.22–0.43$), близкие с наиболее дифференцированными разностями фойяитов ($Eu/Eu^* = 0.30–0.64$) и щелочных сиенитов ($Eu/Eu^* = 0.30–0.31$) (Рис. 4).

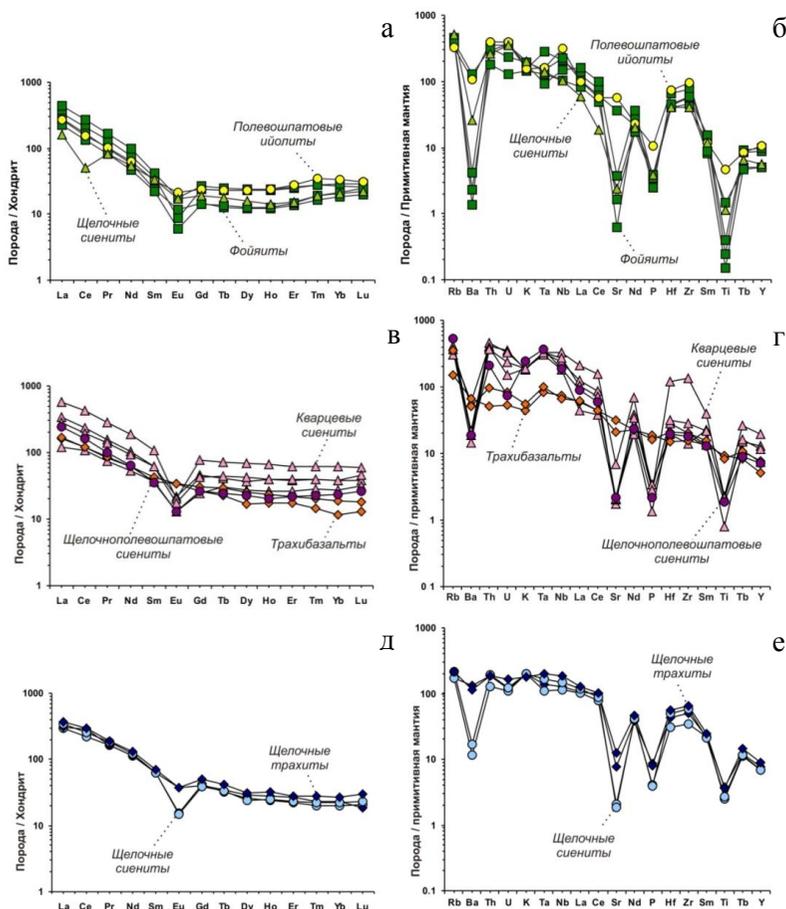


Рис. 4. Диаграммы распределений содержаний РЗЭ и спайдердиаграммы рассеянных элементов для щелочных и субщелочных пород Среднетатарского (а, б), Ягодкинского (в, г) и Порожинского (д, е) массивов. Содержания элементов нормированы по хондриту и примитивной мантии, согласно (McDonough, Sun 1995).

Исследуемые породы имеют однотипные распределения редких и редкоземельных элементов (Рис. 4). Характерны плоские распределения тяжелых и обогащение легкими РЗЭ, более крутые спектры распределений которых наблюдаются в фойюитах Среднетатарского массива. Наличие отрицательных аномалий Ba, Sr, Eu, P и Ti указывает на широко развитый процесс фракционной кристаллизации на этапах эволюции щелочной магмы, связанного, преимущественно, с фракционированием калиевого полевого шпата (Ba), плагиоклаза (Sr, Eu), апатита (P), сфена или ильменита (Ti). Наименее фракционированные спектры, присутствие положительной аномалии Sr, установленные для полевошпатовых ийолитов и трахибазальтов, вероятно, являются отражением ранних стадий дифференциации магмы и ее более быстрого подъема (в случае вулканических пород). Высокое содержание рассеянных, особенно, высоkozарядных элементов (Th, U, Ta, Nb, Hf, Zr), вероятно, связано с присутствием недеплетированного мантийного материала в магматических источниках этих пород.

Для всех изученных щелочных массивах впервые был установлен возраст U-Pb изотопным методом по цирконам, а для Среднетатарского массива также по сфену (рис. 5). Новые U-Pb геохронологические данные позволили выявить близкие возрастные оценки по сфену и цирконам для фойюита Среднетатарского массива, варьирующие в интервале 711-700 млн. лет. Эти возрастные оценки близки с возрастом щелочных пород захребетнинского комплекса в северной части Татарско-Ишимбинской сутурной зоны (Постников и др., 2005). Вслед за ними, около 680 млн. лет назад, в этой же тектонической зоне формировались породы Ягодкинского массива, согласно U-Pb исследованиям цирконов из кварцевых сиенитов (рис. 5в).

Большое значение имеют полученные новые Ar-Ar данные возраста по слодам и амфиболу из карбонатитов, которые также размещены в пределах Татарско-Ишимбинской сутурной зоны (рис. 1, ба). Для этих пород $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ оценки возраста, варьируют в широком интервале: по магнезиоарфведсониту – 725.9 ± 6.3 млн. лет, по флогопитам – 647 ± 7 и 637.6 ± 5.7 млн. лет, включая данные (Врублевский и др., 2011). Наиболее раннюю $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастную оценку, на основании более высокой температуры закрытия изотопной системы амфибола по сравнению с флогопитом, авторы этой работы связывают с возрастом карбонатитов. Таким образом, карбонатиты и дайки основных пород, включая щелочные, относимые ранее к пенчегинскому комплексу по (Забродин, Малышев, 1975), являются, вероятно, наиболее близкими по возрасту к щелочным образованиям Среднетатарского массива.

Полученный новый $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст флогопита из карбонатита – 647 ± 7 млн. лет хорошо согласуется со временем наиболее поздних тектонотермальных событий в этой тектонической зоне, то есть со временем вредрения гранитов А-типа Татарского массива, с учетом данных (Верникова и др., 2005). Имеющиеся геологические и структурные факторы, как показано в работе А.Е. Верниковской с соавторами (2013), указывают на то, что становление исследуемых карбонатитовых даек происходило на тех же глубинных уровнях, что и гранитов А-типа (штокоподобных тел) Татарского массива. Следовательно, формирование татарского магматического комплекса активной окраины, учитывая

литературные и вновь полученные геохронологические данные, происходило на протяжении почти 100 млн. лет, в интервале 725–630 млн. лет назад (рис. 1).

Анализ изотопного состава *Sr* и *Nd* показал, что щелочные и субщелочные породы Татарско-Ишимбинской тектонической зоны характеризуются мантийными Sm-Nd и Rb-Sr изотопными характеристиками (рис. 6б). Породы Среднетатарского массива, с учетом (Сазонов и др., 2007; Федорова, 2011) имеют близкие изотопные характеристики с карбонатитами пенченгинского комплекса (Врублевский и др., 2012).

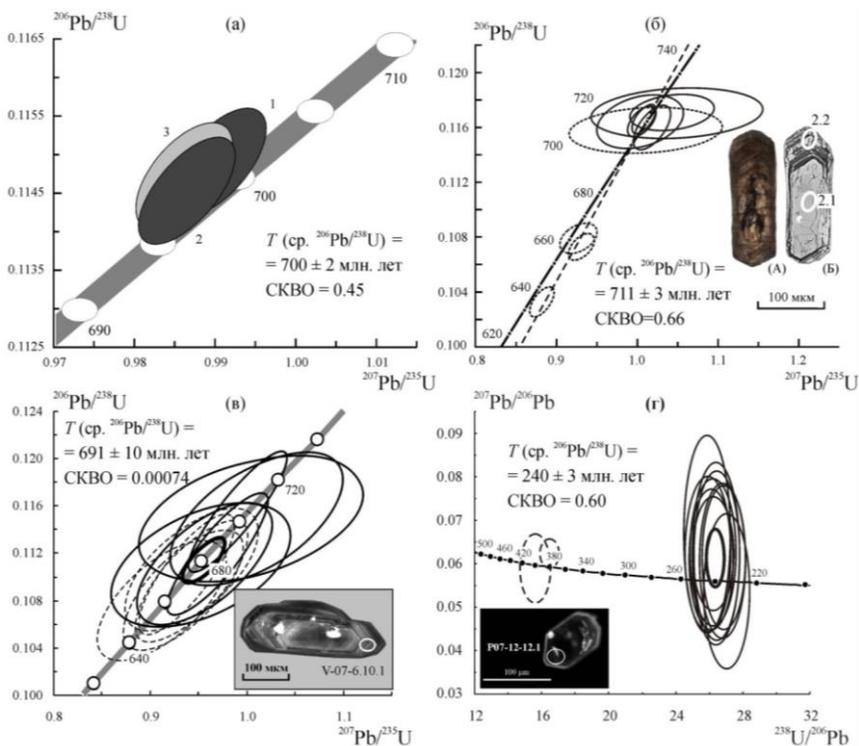


Рис. 5. Диаграммы с конкордией для сфена (а) и цирконов (б-г): из нефелинового сиенита Среднетатарского массива, обр. 05-01-9-6 (б); из кварцевого сиенита Ягодкинского массива, обр. V-07-6 (в); из щелочного трахита Порожинского массива, обр. П-07-12 (г). Эллипсы ошибок аналитических точек соответствуют 2σ .

Составы этих пород вместе с субщелочными породами Ягодкинского массива располагаются между источниками деплетированной мантии НМУ и верхнемантийным ДММ, с возможным участием ЕМ. Для оценки вклада источника НМУ в образование пород необходимы дополнительные исследования изотопного состава свинца. Неопротерозойско-мезопротерозойские оценки $T_{(\text{Nd})\text{DM}}$

модельного возраста, вероятно, указывают на различный вклад древнего континентального корового материала в магматический источник исследуемых щелочных и субщелочных пород.

Повышенные содержания ниобия устанавливаются во многих мафических (амфиболы, биотиты), аксессуарных (пироксенол, колумбит, эвдиалит, паракелдышит, сфен, астрофиллит) и рудных минералах исследуемых щелочных и субщелочных магматических пород. *Татарский комплекс активной континентальной окраины* объединяет также граниты А-типа, характеризующихся обогащением ниобием, как показано в геохимических работах последних лет (Верниковская и др., 2007; 2013), в которых принимала участие и автор представленной диссертационной работы. В связи с этим можно сделать вывод о *ниобиевой геохимической специализации* татарского комплекса щелочных и ассоциирующихся с ними неопротерозойских магматических пород, включая карбонатиты и граниты А-типа.

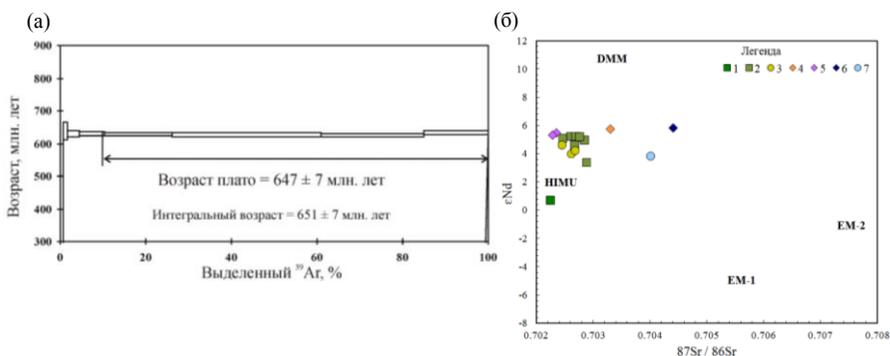


Рис. 6. а) Ar-Ar возрастные спектры для флогопита из карбонатита, пенченгинский комплекс. б) Диаграмма $\epsilon Nd - {}^{87}Sr/{}^{86}Sr$ по (Hofmann, 2007) для щелочных и субщелочных пород Енисейского края. Мантийные источники даны по (Zindler, Hart, 1986).

Среднетатарский массив (1-3): 1 – фойяит; 2 – фойяиты, сиениты и их пегматиты (Сазонов и др., 2007; Федорова, 3 – ийолиты (Сазонов и др., 2007; Федорова, 2011); 4 – трахибазальт Ягодкинского массива; 5 – карбонатиты пенченгинского комплекса (Врублевский и др., 2012); Порожинский массив (6-7): 6 – щелочные трахиты; 7 – щелочные сиениты.

Формирование исследуемых средних интрузивных и вулканических щелочных пород *Приенисейской тектонической зоны* происходило в триасе, 240 ± 3 млн. лет назад, на основании полученной U-Pb оценки возраста цирконов из щелочного трахита Порожинского массива (рис. 5г). Эти породы прорывают лейкограниты А-типа Северинской вулкано-тектонической депрессии в Южно-Енисейском крае (Верниковский и др., 2010; Верниковская и др., 2010). Формирование лейкогранитов связывается с этапом девонского континентального рифтогенеза, во время которого происходило образование интрузивных и вулканогенных пород Агульского грабена и Минусинской впадины в пределах Присаянья и Алтае-Саянской складчатой области. Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные подтверждают преимущественно мантийную природу магматических источников щелочных пород Порожинского массива. Они могли сформироваться

при смешении трех мантийных источников EM-1, EM-II и DMM, с преобладанием последнего (рис. 6б). На вклад континентального корового вещества в их магматический источник указывает девонская оценка $T_{(Nd)}DM$ модельного возраста, близкая ко времени формирования гранитоидов, вмещающих Порожинские щелочные породы.

Возраст щелочных пород Порожинского массива соответствует времени формирования *траппового магматизма* Сибирской платформы, а также, вероятно, нефелиновых сиенитов и ассоциирующих с ними разнообразных магматических пород, включая карбонатиты, Кийского массива (Плюснин и др., 1989), приуроченных к Приенисейской сутурной зоне (рис. 1). Подобный комплекс щелочных и субщелочных пород в связи с траппами Сибирской платформы был установлен на Северо-Западном Таймыре (Верниковский и др., 2001; Dobretsov, Vernikovskiy, 2001). Таким образом, в связи с проявлениями Сибирского суперплюма в раннем триасе, подобно Таймыру, на Енисейском кряже формировались анорогенные гранитоидные и сиенитовые массивы и ассоциирующие с ними вулканиты, включая щелочные разности. Они образовались в периферических зонах плюмового базитового магматизма в структурах, тектонизированных вследствие предшествующих орогенных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ минералогических, геохимических, изотопно-геохимических и геохронологических данных позволяет сделать ряд выводов и обозначить несколько дискуссионных вопросов и наиболее важные направления дальнейших работ.

Крайне ограниченное распространение щелочных массивов на Енисейском кряже, плохая обнаженность, небольшие размеры магматических тел и удаленность – основные трудности, с которыми связано их изучение. Несмотря на большой интерес геологов к этим объектам, начиная с 60-х годов прошлого века, пониманию их природы мешало, прежде всего, отсутствие прецизионных геохимических и U-Pb геохронологических данных, что относило эти объекты к геологически дискуссионным. В представленной работе приведено комплексное минералого-геохимическое изучение, на основании которого были выделены новые разновидности пород, выявлены минералогические особенности, геохимическая специализация, установлены магматические серии, даны U-Pb и Sm-Nd оценки возраста пород и характеристики их магматических источников. Эти данные позволили во многом пересмотреть магматическую и геохимическую эволюцию формирования континентальной коры Енисейского кряжа на протяжении позднего неопротерозоя и раннего мезозоя в контексте тектонической истории. Основным достижением автора является выделение комплексных критериев для характеристики двух щелочных магматических комплексов (Татарско-Ишимбинской и Приенисейской сутурных зон), в том числе выявление Nb геохимической специализации татарского комплекса.

При интерпретации природы магматических источников исследуемых щелочных и ассоциирующих с ними пород остаются некоторые неясные вопросы. Эти исследования необходимо продолжить с применением различных изотопных

методов, в том числе Lu-Hf и Pb-Pb. Одним из важных направлений является изучение природы магматических источников щелочных пород в связи с ассоциирующими с ними гранитами. Также необходимы дополнительные исследования для уточнения возраста карбонатитов Татарско-Ишимбинской тектонической зоны и выявления основных этапов их формирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах

1. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., **Верниковская И.В.**, Матушкин Н.Ю., Яснев А.М. Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Докл. РАН, 2008, т. 419, № 1, с. 90-94.
2. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., **Романова И.В.**, Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Травин А.В. Проявления палеозойского и раннемезозойского магматизма в раннедокембрийской структуре Южно-Енисейского кряжа // Доклады РАН, 2010, т. 432, № 1, с. 82-88.
3. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., **Романова И.В.**, Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Травин А.В. Среднепалеозойский и раннемезозойский анорогенный магматизм Южно-Енисейского кряжа: первые геохимические и геохронологические данные // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 5, с. 701-716.
4. **Романова И.В.**, Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Ларионов А.Н. Позднепротерозойский щелочной и ассоциирующий с ним магматизм в западном обрамлении Сибирского кратона: петрография, геохимия и геохронология // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 11, с. 1530-1555.
5. Верниковская А.Е., Дашенко В.М., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Лаевский Ю.М., **Романова И.В.**, Травин А.В., Воронин К.В., Лепехина Е.Н. Эволюция магматизма и карбонатит-гранитная ассоциация в неопротерозойской активной континентальной окраине Сибирского кратона: термохронологические реконструкции // Доклады РАН, 2013, т. 448, № 5, с. 555-562.

Материалы в сборниках научных конференций

6. **Верниковская И.В.** Петрография и геохимия щелочных пород Среднетатарского массива, Енисейский кряж // Международная Научная Студенческая Конференция "Студент и Научно-Технический прогресс": Геология, тезисы: НГУ, Новосибирск, 2007, 23 с.
7. Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Sal'nikova E.B., **Vernikovskaya I.V.**, Matushkin N.Yu., Yasenev A.M. The 700-630 Ma A-type granites and syenites of the Yenisey Ridge fold belt, western margin of the Siberian Craton: geochemistry, geochronology, and geodynamics // 6th International Hutton Symposium, Origin of Granites and Related Rocks, Abstracts: Stellenbosch, South Africa, 2-6 July, 2007.
8. **Vernikovskaya I.V.**, Sal'nikova E.B., Vernikovskaya A.E., Matushkin N.Yu., Yasenev A.M. The Neoproterozoic alkaline rocks of the Yenisey Ridge, western margin of the Siberian Craton: mineralogy, geochemistry and geochronology // 17th Annual V.M. Goldschmidt Conference, Abstracts: Cologne, Germany, 19-24 August, 2007. A1065 p.
9. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., **Верниковская И.В.**, Матушкин Н.Ю., Яснев А.М. Геохимия и геохронология неопротерозойских и ассоциирующих с ними пород Татарского комплекса, Енисейский

кряж // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Всерос. науч. конф., посвящ. 50-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и памяти акад. Л.В. Таусона в связи с 90-летием со дня рожд.: г. Иркутск, 24-30 сентября 2007, т. 2., с. 33-34.

10. **Верниковская И.В.**, Матушкин Н.Ю. Щелочные сиениты и ассоциирующие с ними породы Порожинского массива: геология, петрография и геохимия // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 100-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию создания Сибгеолкома в России. Томск, 2008. 91-92 с.
11. **Верниковская И.В.** Петрография и геохимия щелочных пород Ягодкинского и Порожинского массивов, Енисейский кряж // Международная Научная Студенческая Конференция “Студент и Научно-Технический прогресс”: Геология, тезисы: НГУ, Новосибирск, 26-30 апреля, 2008, 111-112 с.
12. **Верниковская И.В.** Щелочные комплексы Татарско-Ишимбинской зоны Енисейского кряжа: новые данные о возрасте // Международная Научная Студенческая Конференция “Студент и Научно-Технический прогресс”: Геология, тезисы: НГУ, Новосибирск, 11-15 апреля, 2009, 51-52 с.
13. Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., Верниковский В.А., **Романова И.В.**, Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Травин А.В. Фанерозойский континентальный внутриплитный магматизм Южно-Енисейского кряжа: первые геохимические и геохронологические данные // Материалы совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». Иркутск, 11-14 октября 2009. т. 1., с. 53-55.
14. **Романова И.В.**, Матушкин Н.Ю., Романов М.И. Минералогия и геохимия щелочных и субщелочных пород Татарского комплекса, Енисейский кряж // тезисы Международной конференции “Геохимия магматических пород. Школа «Щелочной магматизм Земли». Москва-Крым, 9-16 сентября, 2010.
15. Верниковская А.Е., **Романова И.В.**, Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Травин А.В. Редкометальный магматизм на этапах позднепротерозойской геодинамической эволюции Енисейского кряжа // Материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти академика В.И. Коваленко «Граниты и процессы рудообразования». Москва, ИГЕМ РАН, 25-26 октября 2011. с. 44-45.
16. Vernikovskaya A.E., Vernikovsky V.A., Matushkin N.Yu., **Romanova I.V.**, Polyansky O.P., Laevsky Yu.M., Voronin K.V. Association of A-type granites and carbonatites in the southwestern framing of the Siberian craton: is it unique? // 34rd International Geological Congress (34IGC), Brisbane, Australia, 5-10 August, 2012.

Технический редактор Е.Г.Соколова

Подписано к печати 07.05.2013

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ. л. 0,9. Тираж 120. Зак. №88

ИНГТ СО РАН, ОИТ, пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090