

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФАКТОРЫ ВАРИАЦИЙ СОСТАВА ПОРОД СРЕДНЕ-ТАТАРСКОГО СВОДА (ЗААНГАРСКИЙ МАССИВ)

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Приведены геологическая характеристика Средне-Татарского массива, особенности химического состава породообразующих минералов фойяитов и ийолитов, занимающих преобладающее распространение в составе интрузии. Представлены результаты петрохимической аттестации главных петрографических разновидностей пород, участвующих в строении массива, их петрохимическая специализация. Рассмотрены ведущие факторы вариации состава пород интрузии.

Ключевые слова: фойяиты; ийолиты; перитектическая кристаллизация; фракционирование.

Химический и минеральный состав, разнообразие форм и геологических обстановок проявления щелочных пород зависит от многих факторов, в том числе от первоисточника щелочных магм и дифференциации расплавов при становлении щелочных интрузий. Механизмы дифференциации нередко являются ключевыми при формировании месторождений, связанных со щелочными породами, и обуславливают, наряду с метасоматическими процессами, их геохимическую и, как следствие, металлогеническую специализацию.

Формирование полихронного Средне-Татарского (Заангарского) массива ($T \approx 700\text{--}610$ млн лет) [1, 2] связано с этапом плюмовой активности на рубеже $\approx 670\text{--}700$ млн лет назад, способствующим возникновению центров магматизма повышенной щелочности в Заангарье [3]. Породы массива содержат редкометалльно-редкоземельную и микроскопическую благороднометалльную минерализацию [4, 5]. Анализ данных по распределению редких элементов и радиогенных изотопов Nd и Sr в породах Средне-Татарской интрузии позволяет говорить о формировании массива в обстановке рифтинга и неоднократного внедрения мантийных фельдшпатоидных магм [1]. Для выявления тенденций вариативности состава пород Средне-Татарского массива, степени и характера их дифференцированности была проведена их петрохимическая аттестация. Изучение распределения главных петрогенных оксидов в породах интрузии позволило уточнить их принадлежность к определенным петрохимическим сериям, изучить изменчивость их мафичности, щелочности как от более ранних фаз к поздним, так и внутри фаз и выявить основные механизмы, повлиявшие на их вещественную неоднородность.

Геологическая позиция и петрографическая характеристика пород Средне-Татарского массива. Средне-Татарская интрузия расположена в юго-западной части Енисейского кряжа, в бассейне р. Татарка – правого притока р. Ангара. Это наиболее крупный (площадь выхода на поверхность около 12 км^2) и хорошо изученный из четырех щелочных массивов одноименного комплекса. Размещение массива контролируется глубинными разломами субширотного и северо-западного направлений. Интрузия штокообразной формы с многочисленными апофизами залегает среди верхнерифейских сланцев и мраморизованных известняков. Вмещающие породы достаточно узкой приконтактной зоны (200–500 м) фенитизированы [4]. Массив сложен преимущественно фойяитами и ийолитами (рис. 1).

Преобладают лейкократовые фойяиты ранней фазы ($675 \pm 5,8$ млн лет [1]) и их жильная фация – щелочные

сиенит-пегматиты, развитые как в пределах массива, так и вне его. Более поздняя фаза ($609,2 \pm 7,3$ млн лет [1]) представлена ийолитами, образующими субгоризонтальную пластовую залежь, выходящую на поверхность в центральной части плутона в виде удлиненного в северо-западном направлении тела мощностью около 200 м с извилистыми границами. Помимо этого, в подчиненном количестве присутствуют ювиты и малиньиты. Контакты между ийолитами и фойяитами имеют инъекционный характер.

Фойяиты представлены светло-серыми породами со значительными вариациями количественно-минерального состава и большим разнообразием акцессорных и постмагматических минералов. Породы сложены нефелином (20–40%), микроклином (15–50%), альбитом (5–15%), эгирином (5–20%). Наиболее часто встречаемые акцессорные минералы представлены сфеном, флюоритом, апатитом, цирконом. Породообразующие минералы (нефелин, микроклин, альбит) часто представлены двумя генерациями в магматической стадии формирования породы и неоднородностью в кристаллизационном рядообразовании. Наблюдаются включения нефелина первой генерации в зерна второй генерации, составляющие основную часть фойяитов, и прорастание нефелина микроклином. Микроклин первичномагматический с ясной микроклиновой решеткой часто замещается более поздним метасоматическим нерешетчатым микроклином. Альбит присутствует как первичномагматический, в виде включений в микроклин, так и постмагматический – в мелкозернистых скоплениях по краям микроклиновых зерен и между ними и нефелином.

Северо-восточный эндоконтакт интрузии представлен мусковитовыми сиенитами – продуктами гидротермально-метасоматической мусковитизации фойяитов [1].

Среди ийолитов различаются: нефелин-эгириновые, не содержащие полевого шпата, и наиболее распространены полевошпатовые разновидности. В мезократовых ийолитах, минеральный состав представлен нефелином $\approx 50\%$, эгирином $\approx 30\%$, сфеном $\approx 12\%$, биотитом $\approx 8\%$. Среди акцессорных преобладают апатит, флюорит, рудные. Наряду с ийолитами, содержащими соразмерные минералы с минимальным количеством вростков, преобладают ийолиты с пойкилитовой микроструктурой, в которых содержится множество включений всех минералов породы в ксеноморфном нефелине. Наблюдается эгирин двух генераций. Для полевошпатосодержащих ийолитов присутствующие в них микропертит и микроклин могут составлять до 26% [4].

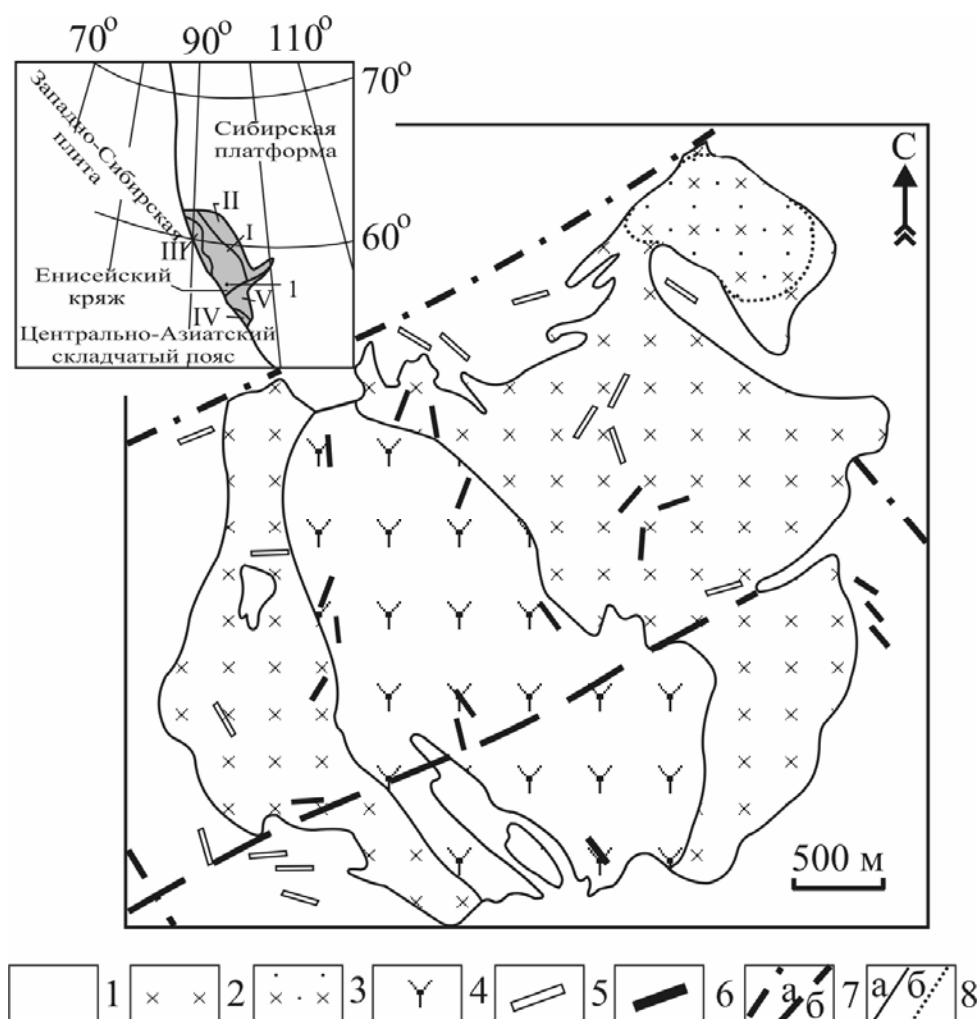


Рис. 1. Схема геологического строения Средне-Татарского массива (по материалам Ангарской ГРЭ и [4]):
 1 – терригенно-карбонатные отложения позднего рифея (свиты Сухого хребта и горевская); 2–6 – Средне-Татарский комплекс:
 2 – фойяиты, 3 – мусковитовые сиениты, 4 – полевошпатовые ийолиты, 5 – щелочные сиенит-пегматиты, 6 – фойяит-пегматиты;
 7 – разрывные нарушения (а – второстепенные, б – скрытые под вышележащими образованиями); 8 – границы
 (а – геологических тел, б – фациальные). На врезке показано географическое положение Средне-Татарского массива (I).
 Структурное районирование региона приводится по [6]: I–V – террейны: Центрально-Ангарский (I),
 Восточно-Ангарский (II), Исаковский (III), Предивинский (IV), Ангаро-Канский (V)

Щелочные пегматиты, сформированные на завершающем этапе становления интрузии, широко проявлены как в пределах массива, так и во вмещающих его известняках и представлены фойяит-пегматитами и сиенит-пегматитами не содержащими нефелина. Все первично-магматические породы подверглись в разной степени микроклинизации и альбитизации.

Установленные концентрации главных и примесных минералообразующих оксидов в минералах фойяитов и ийолитов Средне-Татарского массива, определенные микронзондовым анализом в лаборатории микронзондового анализа ИГиМ СО РАН г. Новосибирска, представлены в табл. 1. Анализ были подвергнуты нефелин, микроклин, альбит, эгирин, биотит. Нефелин из пород интрузии соответствует стандартному нефелину с незначительной примесью в нем Fe. В целом содержания главных элементов в нефелине из фойяита и ийолита Средне-Татарского массива находятся в пределах их содержания для нефелина нефелиновых сиенитов и ийолитов Кузнецкого Алатау, массива Ковдор (Кольский полуостров) [7]. В полевошпатовом ийолите нефелин представлен двумя разновидностями. Нефелин 2

характеризуется повышенными содержаниями Ca и Al и пониженными содержаниями Fe и Si относительно нефелина 1.

Микроклин из ийолита содержит небольшие примеси Fe и Ti и также представлен двумя разновидностями. Микроклин 1 характеризуется повышенным содержанием Fe и преобладающим количеством Ca над Ti. Разности микроклина из фойяита не содержат примеси Ti и отличаются наличием в микроклине 1 примеси Mg и Ca относительно микроклина 2. Разновидности альбита из полевошпатового ийолита в целом характеризуются незначительной (менее 1%) примесью Ca и K и содержат примесь Fe. Отличаются вариациями концентраций Ca и K. Альбит из фойяитов содержит меньше примеси Ca и больше примеси Fe относительно альбита из ийолита. Альбит 1 из фойяитов не содержит примеси Ca, но в нем присутствует значительно больше Fe.

В эгиринах наблюдаются существенные колебания в содержании натрия. Для эгиринов из фойяита характерно его повышенное содержание (12,44–13,21 мас. %) относительно эгиринов из ийолита (2,28–2,43 мас. %), которые, в свою очередь, существенно

обогащены кальцием. Генерации эгирина из ийолита различаются преобладанием Al над Mg в составе эгирина 2 и вдвое повышенным содержанием Ti относительно эгирина 1. Эгирин из фойяита характеризуется постоянством состава. Для биотита из ийолита наблю-

дается пониженное содержание кремнезема относительно биотита магматических пород [8] и существенно повышенное содержание Ca, в целом же химический состав биотита находится на уровне содержания главных петрогенных оксидов в этом минерале.

Т а б л и ц а 1

Химический состав породообразующих минералов

Минерал	Полевошпатовый ийолит								
	Нефелин 1	Нефелин 2	Микроклин 1	Микроклин 2	Альбит 1	Альбит 2	Эгирин 1	Эгирин 2	Биотит
SiO ₂	43,720	45,210	62,180	64,320	68,570	68,930	48,710	47,960	32,020
TiO ₂	0,00	0,00	0,076	0,016	0,003	0,003	0,192	0,417	0,646
Al ₂ O ₃	32,920	36,480	19,600	18,310	19,510	19,460	1,090	1,360	13,310
Σ FeO	0,300	0,216	0,087	0,139	0,078	0,079	25,160	25,300	34,650
MgO	0,00	0,00	0,005	0,001	0,00	0,00	1,200	0,762	0,508
CaO	0,043	1,080	0,037	0,033	0,062	0,118	18,800	18,180	4,350
Na ₂ O	15,980	15,490	0,778	1,370	11,410	11,470	2,280	2,430	0,391
K ₂ O	6,290	5,790	14,300	14,250	0,105	0,075	0,010	0,023	8,550
Сумма	99,254	104,266	97,063	98,439	99,738	100,135	98,852	97,782	95,385
Кристаллохимические формулы									
Si	4,228	4,135	2,942	2,999	3,00	3,003	1,921	1,913	4,141
Ti	0,00	0,00	0,003	0,001	0,00	0,00	0,006	0,012	0,063
Al	3,748	3,928	1,092	1,005	1,005	0,998	0,051	0,064	1,013
Fe	0,022	0,015	0,003	0,005	0,003	0,003	0,746	0,759	1,685
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,070	0,045	0,098
Ca	0,004	0,106	0,002	0,002	0,003	0,006	0,794	0,776	0,602
Na	2,993	2,744	0,071	0,124	0,967	0,968	0,174	0,188	0,049
K	0,775	0,675	0,862	0,847	0,006	0,004	0,001	0,001	0,705
Минерал	Фойяит								
	Нефелин		Микроклин 1	Микроклин 2	Альбит 1	Альбит 2	Эгирин		
SiO ₂	43,900		64,590	65,640	69,460	67,760	52,690		
TiO ₂	0,00		0,001	0,010	0,00	0,002	0,748		
Al ₂ O ₃	33,240		17,740	17,800	18,440	18,630	1,520		
Σ FeO	0,559		0,038	0,151	0,313	0,194	27,490		
MgO	0,00		0,008	0,00	0,00	0,00	0,183		
CaO	0,011		0,013	0,010	0,008	0,018	1,420		
Na ₂ O	16,130		0,244	0,545	11,990	11,790	12,440		
K ₂ O	6,820		16,580	16,330	0,066	0,065	0,011		
Сумма	100,660		99,214	100,487	100,295	100,459	96,946		
Кристаллохимические формулы									
Si	4,203		3,015	3,021	3,028	3,009	2,052		
Ti	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,022		
Al	3,747		0,975	0,964	0,947	0,974	0,070		
Fe	0,040		0,001	0,005	0,010	0,006	0,805		
Mg	0,00		0,001	0,00	0,00	0,00	0,011		
Ca	0,001		0,001	0,00	0,00	0,001	0,059		
Na	2,991		0,022	0,049	1,012	1,014	0,939		
K	0,832		0,986	0,958	0,004	0,004	0,001		

Наличие нескольких фаз породообразующих минералов фойяитов с различными формами выделений зерен и их взаимные прорастания свидетельствуют о эволюции магматического расплава в процессе их кристаллизации. Присутствие среди меланократовых ийолитов разновидностей, сложенных как соразмерными, с близкой степенью идиоморфизма, зернами темноцветных минералов (преимущественно эгирина) и нефелина, и разностей с пойкилитовой микроструктурой, а также наличие их полевошпатовых разностей может быть результатом дифференциации магматического расплава при формировании этих пород.

Петрохимическая аттестация пород интрузии.

По химическому составу породы массива в целом обеднены кремнекислотой (SiO₂ = 46–62%), обогащены глиноземом (Al₂O₃ = 17–28%) и щелочами (K₂O + Na₂O = 6–17%) с преобладанием Na₂O. Для фойяитов характерно большее содержание этих петрогенных элементов, ийолиты содержат большее количество ок-

сидов железа, магния, кальция. Несмотря на эти отличия фойяитам и ийолитам присущи общие черты химизма, что, наряду с их родством, фиксируемым при сопоставлении минерального состава, может свидетельствовать о едином магматическом источнике. Это подтверждается изотопным составом пород Средне-Татарской интрузии. Несмотря на значительную разницу в возрасте, щелочные породы массива имеют сходный изотопный состав первичных отношений изотопов Sr и Nd в фойяитах ($\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 4,7-5,2$; $\epsilon_{\text{Sr}}(T) = -12,4...-17,8$) и ийолитах ($\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 4,0-4,6$; $\epsilon_{\text{Sr}}(T) = -15,7...-18,9$), характеризующий близкое родство источников фойдовых магм [1]. В этом случае можно предположить, что разнообразие пород массива может быть обусловлено кристаллизационной эволюцией расплава.

Петрохимическая аттестация разновидностей горных пород, участвующих в строении Средне-Татарского массива, позволила в процессе изучения массива данных из 209 силикатных анализов осуществ-

вить их типизацию на основе кластерного анализа и выборочного расчета нормативного минерального состава пород по методу CIPW. Из всей совокупности проанализированных пород по соотношению кальция, кремнезема, глинозема и щелочей выделяются силикатная ($\text{CaO} = 0\text{--}9\%$; $\text{SiO}_2 = 45\text{--}62\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17\text{--}34\%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 4\text{--}17\%$) и карбонатная ($\text{CaO} = 39\text{--}75\%$; $\text{SiO}_2 = 11\text{--}37\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2\text{--}8\%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 0\text{--}3\%$) ассоциации. Наиболее петрохимически контрастная карбонатная ассоциация объединяет силицитизированные

и скарнированные породы вмещающей горевской свиты. Более представительна силикатная ассоциация, объединяющая плагиоидолиты, фоййиты, мусковитовые сиениты и продукты их выветривания. Она включает натровую ($\text{Na}_2\text{O} = 3\text{--}12\%$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0,2\text{--}2$) и калиевую ($\text{Na}_2\text{O} = 0,3\text{--}1,3\%$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 3\text{--}28$) породные группы, отличающиеся по уровню концентрации натрия и их щелочной специализации. Калиевая группа объединяет породы, подвергшиеся наиболее интенсивному выветриванию (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав петрохимических разновидностей пород Средне-Татарского массива, мас. %

Содержание	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 (вал)	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$
Карбонатная ассоциация										
Среднее	18,66	0,20	4,58	2,80	7,68	64,49	0,47	1,11	1,59	6,68
Минимальное	11,26	0,03	2,37	1,89	4,13	38,81	0,05	0,34	0,82	0,24
Максимальное	36,75	0,39	7,74	3,62	9,67	75,45	1,68	2,01	3,42	30,00
Силикатная ассоциация										
Среднее	56,52	0,46	22,58	4,53	0,53	2,20	8,39	4,79	13,18	0,83
Минимальное	45,74	0,00	16,97	2,36	0,00	0,20	0,26	1,75	3,67	0,17
Максимальное	61,66	4,56	33,99	11,32	6,44	8,63	11,84	7,88	17,19	28,43
Элементы натровой группы силикатной ассоциации										
Среднее	56,60	0,45	22,41	4,45	0,49	2,23	8,57	4,80	13,37	0,58
Минимальное	45,74	0,00	16,97	2,36	0,00	0,20	2,68	1,75	7,57	0,17
Максимальное	61,66	4,56	27,54	11,32	3,58	8,63	11,84	7,88	17,19	2,29
Элементы калиевой группы силикатной ассоциации										
Среднее	53,34	0,76	29,37	8,06	2,01	1,23	0,77	4,46	5,23	11,07
Минимальное	51,65	0,10	24,76	3,38	0,06	0,53	0,26	2,81	3,67	2,88
Максимальное	55,31	1,52	33,99	10,92	6,44	2,16	1,33	7,26	7,51	28,43

Натровая группа включает в себя практически все петрографические разновидности, подразделяясь внутри на 4 подгруппы по содержанию кремнезема, мафических компонентов щелочей и глинозема. Мафические ультращелочная и щелочная подгруппы объединяют лейко- и мезократовые плагиоидолиты с низким уровнем концентрации кремнезема (до 53%). Отличаются подгруппы соотношением силикатных и феррических компонентов. Повышенная щелочность лейкократовых разновидностей подчеркивается и более высокими концентрациями нормативных фельдшпатоидов (20 – 26%) относительно меланократовых ийолитов (15–22%). Наиболее распространены в пределах Средне-Татарского массива породы субсалической ультращелочной подгруппы, объединяющие практически все магматиты среднего состава (фоййиты и их пегматоидные разновидности) и продукты начальной стадии их выветривания с низкой степенью разделения из-за слабой контрастности этой подгруппы, что подчеркивает близость состава исходных пород.

Сопоставление нормативных составов основных петрографических типов пород щелочных и ультращелочных подгрупп показало, что классические полевошпатовые ийолиты выделяются по повышенным концентрациям нормативного нефелина, на фоне значительной (более 20%) доли феррических минералов. Их ультралейкокатовые разновидности практически не содержат нормативных пироксенов, затрудняя их петрохимическое разделение с фоййитами. Диагностические особенности нормативного состава фоййитов проявлены в наличии нормативного корунда (до 2%), подчеркивающего недосыщение пород щелочами. Для пегматоидных разновидностей по концентрациям феррических минералов наблюдается сближение с плагиоидо-

литами, а по соотношению нормативных нефелина и полевошпатов – с фельдшпатоидными сиенитами (0,12–0,23), что, вероятно, может определяться их формированием в результате частичного растворения продуктов ранних фаз внедрения, более поздними расплавами.

Субсалическая высокоглиноземистая подгруппа представлена мусковитовыми сиенитами, характеризующимися значительным обогащением глиноземом (до 27%) на фоне понижения щелочности (до 8%), что выражается в появлении нормативного силлиманита (18–26,5%) и кварца (до 23%). Низкая ферричность (суммарное содержание доли FeO , MgO , CaO не превышает 7%) сближает их с фоййитами.

Петрохимическая специализация пород массива.

Для выявления особенностей, проявившихся при эволюции расплава и повлиявших на вещественную неоднородность пород массива, была оценена петрохимическая специализация пород интрузии. В соответствии со схемой О.А. Богатикова на классификационной диаграмме $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ большинство фигуративных точек исследуемых пород попадают в поля магматитов щелочной серии, за исключением мусковитовых сиенитов и небольшого количества фигуративных точек фоййитов, частично подвергшихся процессу гидротермально-метасоматической мусковитизации (рис. 2).

На диаграмме А. Мияширо $\text{FeO}^t/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ большинство фигуративных точек обнаруживают толеитовую специализацию (рис. 3). Оценка щелочной специализации (диаграмма $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$) позволяет отнести породы массива к продуктам калиево-натриевой серии. Локальное отклонение фигуративных точек в поле калиевой серии фиксируется для мусковитизированных разновидностей, в которых предполагается значительный вынос натрия на фоне обогащения калием.

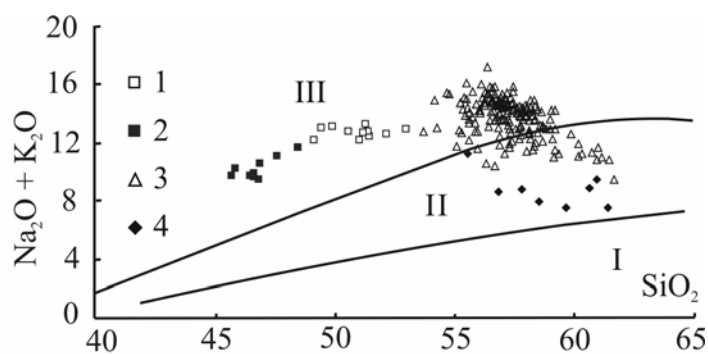


Рис. 2. Петрохимическая типизация пород Средне-Татарского массива в координатах классификационной TAS диаграммы: 1 – лейкокриты; 2 – мезократовые ийолиты; 3 – фойиты; 4 – мусковитовые сиениты. I–III – композиционные поля магматических пород: I – нормальной щелочности; II – субщелочного ряда; III – щелочного ряда [7]

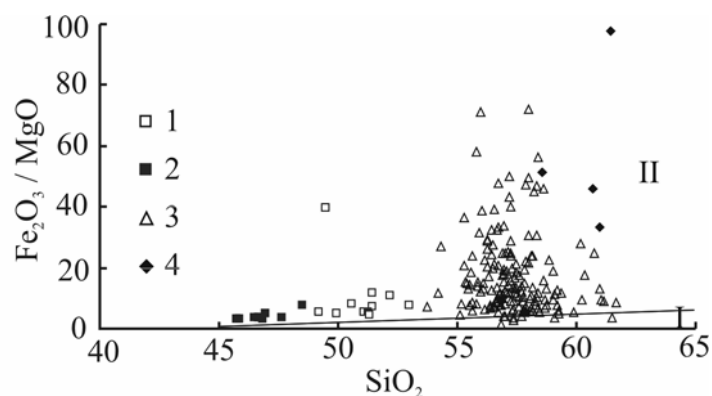


Рис. 3. Петрохимическая типизация пород Средне-Татарского массива на классификационной бинарной диаграмме $\text{FeO}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$. 1–4 – представительные химические составы пород (условные обозначения см. в пояснении к рис. 2). Поля I, II ограничены составами известковой и толеитовой серий соответственно. Направления эволюции химизма пород каждой фазы массива: 1 – фойитов; 2 – ийолитов. Граница полей нанесена в соответствии со схемой О.А. Богатикова с соавт. [9]

Анализ диаграммы Л.С. Бородина ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{CaO} - \text{As}$) также подтверждает развитие среди пород Средне-Татарского массива производных магматической серии повышенной щелочности (рис. 4). Однако отчетливо проявленные на этой диаграмме различные эволюционные тренды фигуративных точек пород каждой фазы массива указывают на различные механизмы кристаллизации при их становлении.

Оценка унаследованности петрохимических параметров пород Средне-Татарского массива на основании изучения распределения главных петрогенных оксидов относительно содержания кремнезема на соответствующих бинарных диаграммах показала, что вариации содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 в общем отвечают обратной пропорциональной зависимости, отображая степень дифференцированности исходного магматического расплава. Подобное же распределение наблюдается и на диаграммах $\text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ (рис. 5). Фиксируемое в разной степени в обоих случаях отклонение от генерализованной последовательности фигуративных точек фойитов и расщепление вариационного тренда отражает высокую вариативность данных компонентов в высококремниевых областях. Это дополнительно подчеркивает приоритет перитектической кристаллизации при формировании этих пород.

Оценка унаследованности петрохимических параметров пород Средне-Татарского массива на основании изучения распределения главных петрогенных оксидов относи-

тельно содержания кремнезема на соответствующих бинарных диаграммах показала, что вариации содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 в общем отвечают обратной пропорциональной зависимости, отображая степень дифференцированности исходного магматического расплава. Подобное же распределение наблюдается и на диаграммах $\text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ (рис. 5). Фиксируемое в разной степени в обоих случаях отклонение от генерализованной последовательности фигуративных точек фойитов и расщепление вариационного тренда отражает высокую вариативность данных компонентов в высококремниевых областях. Это дополнительно подчеркивает приоритет перитектической кристаллизации при формировании этих пород.

Распределение глинозема в породах Средне-Татарского массива (рис. 6) обнаруживает близкие закономерности с вариациями содержания щелочей и кремнезема (см. рис. 2), подтверждая предположение о различных механизмах фракционной кристаллизации пород ранней и поздней фазы (фойитов и ийолитов).

Таким образом, наблюдаемое накопление в ийолитах щелочных компонентов в остаточном расплаве, а в фойитах – их снижение (например, для Na_2O и K_2O) либо постоянный состав (как в случае Al_2O_3), свидетельствуют о том, что при кристаллизации ийолитов главным фактором является фракционирование темноцветов (пироксенов), а в фойитах отмечается перитектическая кристаллизация полевого шпата и фельдшпатоидов.

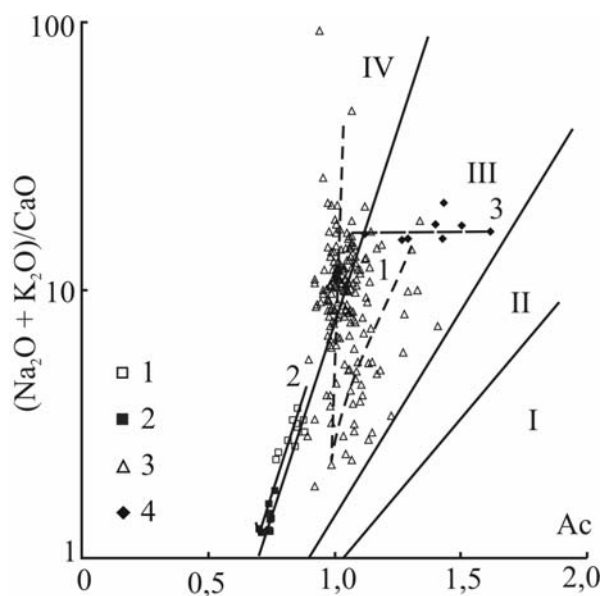


Рис. 4. Вариации и характер щелочности пород Средне-Татарского массива на диаграмме Л.С. Бородина. 1–4 – представительные химические составы пород (условные обозначения см. в пояснении к рис. 2). I–IV композиционные поля магматических пород: I – известковой (толеитовой); II – известково-щелочной; III – субщелочной; IV – щелочной серий [10]. Вариационные тренды пород массива: 1 – фойейтов; 2 – ийолитов; 3 – мусковитовых сиенитов

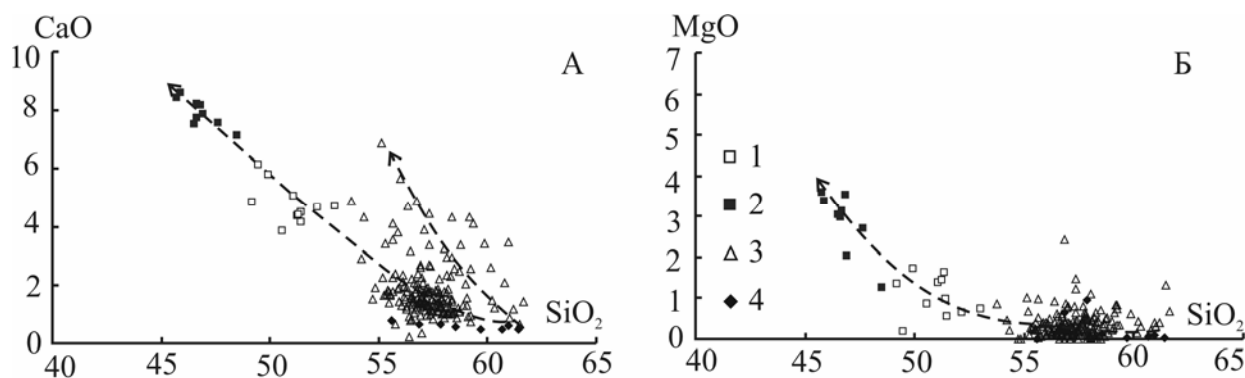


Рис. 5. Вариации вещественного состава пород на бинарных диаграммах: CaO–SiO₂ (А), MgO–SiO₂ (Б). 1–4 – представительные химические составы пород (условные обозначения см. в пояснении к рис. 2). Направления эволюции химизма пород массива

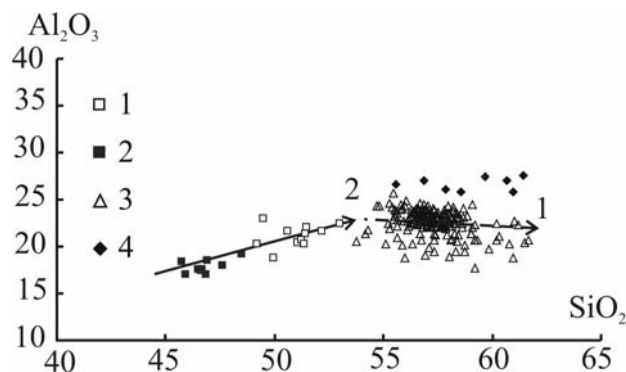


Рис. 6. Вариации вещественного состава пород на бинарных диаграммах Al₂O₃–SiO₂. 1–4 – представительные химические составы пород (условные обозначения см. в пояснении к рис. 2). Направления эволюции химизма пород каждой фазы массива: 1 – фойейтов; 2 – ийолитов

Петрохимические факторы вариаций состава пород массива. Для выявления закономерностей изменения составов пород Средне-Татарского массива и характеристики основных процессов, определяющих вариации их составов, в выборке, объединяющей сили-

катную ассоциацию, был проведен компонентный анализ петрохимической информации. Идентификация ведущих факторов фракционирования, определяющих разнообразие пород интрузии, осуществлялась с помощью статистического анализа методом главных компо-

нент. Вариации петрохимических параметров пород в пределах выборки определяются тремя главными компонентами с суммарным вкладом 83%. Их обобщенная структура выглядит следующим образом:

$$F_{1(49\%)} = \frac{Si_{36}(Na + K)_{29} Al_{23} Na_{22} K_{22}}{Fe_{43} Ti_{40} Ca_{39} Mg_{38}};$$

$$F_{2(23\%)} = \frac{(K/Na)_{50} Al_{45}}{Na_{53}(Na + K)_{43} Ca_{21}};$$

$$F_{3(11\%)} = \frac{Si_{44}}{K_{72}(Na + K)_{35} (K/Na)_{34}}.$$

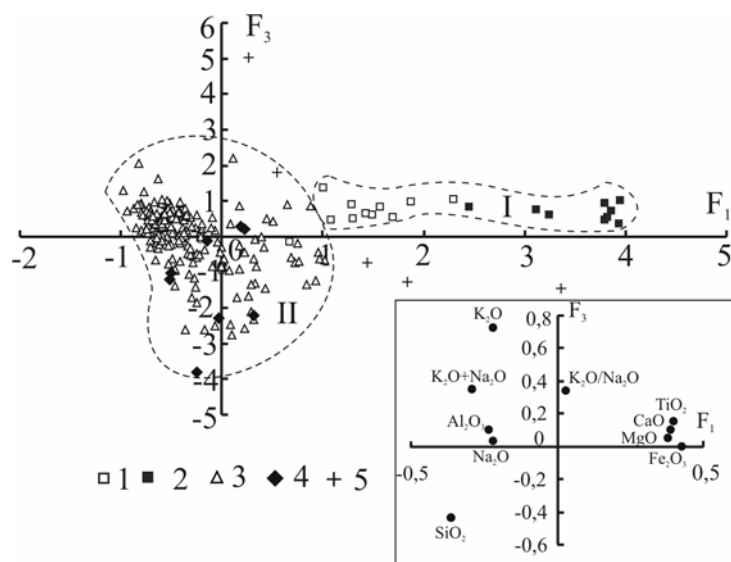


Рис. 7. Распределение фигуративных точек пород Средне-Татарской интрузии в плоскости координат F1–F3. I – мафическая ультращелочная подгруппа; 2 – мафическая щелочная подгруппа; 3 – субщелоческая ультращелочная подгруппа; 4 – субщелоческая высокоглиноземистая подгруппа; 5 – калиевая подгруппа. Во врезке – матрица факторных нагрузок главных компонент. Выделенные совокупности: I – породы мафических ультращелочной и щелочной подгрупп, II – породы субщелоческих ультращелочной и высокоглиноземистой подгрупп

Вторая компонента характеризует, по видимому, направленность экзогенных процессов, определяемую разложением темноцветов и фельдшпатоидов с образованием мусковита, что проявляется поведением кальция и натрия при наличии обратной корреляции с глиноземом и калий-натровым отношением. Эта тенденция показывает избирательный характер вторичных преобразований различных пород Средне-Татарского массива, что подтверждается и результатами приведенной выше петрохимической аттестации. Метасоматические изменения фиксируются преимущественно при аттестации фельдшпатоидных сиенитов и диагностируются избытком глинозема по отношению к щелочам в слабепереработанных породах и появлением нормативных алюмосиликатов в интенсивно преобразованных разностях. Вторичные изменения плагийолитов выразились в формировании контрастных кластеров калиевой группы – монтмориллонит-гидрослюдистой коры выветривания.

Третья компонента, вероятно, фиксирует распределение в изученных породах полевых шпатов и отражает их перитектическую кристаллизацию, так как характеризуется высокой положительной корреляционной связью суммы щелочей, калия и калий-натрового от-

Первый фактор, оказывающий наибольшее влияние на вариативность пород массива, отражает разделение магматического расплава в промежуточной камере и дифференциацию порций ийолитовой магмы in situ и четко фиксируется линейной дисперсией выборки фигуративных точек ийолитов вдоль оси абсцисс (рис. 7).

Дифференциация выборки ийолитов подчеркивает ведущее значение фракционной кристаллизации феррических минералов (пироксенов, сфена) в качестве ранних кумулятивных фаз именно при внедрении второй фазы Средне-Татарского массива.

ношения на фоне устойчивых отрицательных связей с кремнеземом. Данный антагонизм кремния по отношению к калию, при относительно нейтральном поведении натрия, фиксирует реакцию обогащенного кремнекислотой остаточного расплава первой фазы внедрения и его перитектическую реакцию с ранними фельдшпатоидами, по всей вероятности, калиевой группы, что и определяет особенности формирования фойяитов Средне-Татарского массива. На диаграмме это фиксируется ортогональной деформацией вариационного поля фигуративных точек фойяитов (рис. 8).

Таким образом, наряду с отмечаемым сходством минерального состава пород основных фаз интрузии (фойяитов и ийолитов), общими чертами химизма и близким источником фойдовых магм являются их вещественная неоднородность, значительный временной интервал и различные процессы формирования.

Петрохимическая специализация пород интрузии показывает, что их петрографическое разнообразие в целом определяется кристаллизационной эволюцией продуктов калий-натриевой щелочной серии. Одновременно геометрия вариационных трендов указывает на некоторую вариативность факторов фракционирования при становлении пород разных фаз массива.

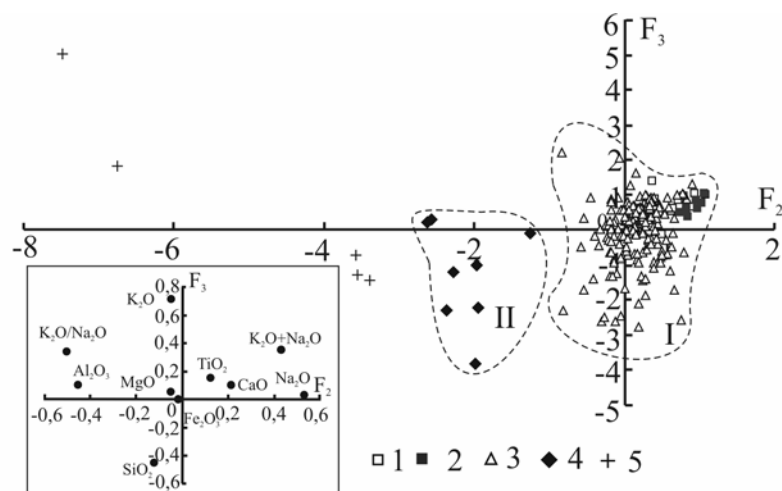


Рис. 8. Распределение фигуративных точек пород Средне-Татарской интрузии в плоскости координат F2–F3 (условные обозначения см. в пояснении к рис. 7). Во врезке – матрица факторных нагрузок главных компонент. Выделенные совокупности: I – породы мафических ультращелочной и щелочной подгрупп и субщелочной ультращелочной подгруппы; II – метасоматиты субщелочной высокоглиноземистой подгруппы

Основным фактором при кристаллизации ийолитов выступает фракционирование темноцветов (пироксенов), а при формировании фойяитов ведущим фактором выступает перитектическая кристаллизация полевого шпата и фельдшпатоидов. Это отражается и в структурах главных компонент, определяющих вариации петрохимических параметров пород, подчеркивая ведущую роль перитектической кристаллизации расплава в процессе формирования фойяитов первой фазы и влияние процессов фракционирования феррических компонентов на петрографическую вариативность продуктов кристаллизации ийолитового магматического

расплава второй фазы и его дифференциацию *in situ* на мезократовые щелочные и лейкократовые ультращелочные разновидности. Отсутствие четких корреляционных зависимостей между степенью дифференциации и перитектическим фракционированием калиевого полевого шпата свидетельствует о различных пространственно-временных характеристиках их проявления. Таким образом, можно говорить о том, что вещественная неоднородность пород Средне-Татарского массива обусловлена эволюцией фойдитового расплава, связанной с различными механизмами фракционирования и кристаллизации магмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф. и др. Заангарский щелочной интрузив, Енисейский край: Rb-Sr-, Sm-Nd-изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии // ДАН. 2007. Т. 413, № 6. С. 798–802.
2. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б. и др. Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского крата: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // ДАН. 2008. Т. 419, № 1. С. 90–94.
3. Корнев Т.Я., Кочевский Л.К., Ножкин А.Д. и др. Рабочая схема корреляции магматических и метаморфических комплексов Енисейского края // Региональные схемы корреляции магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: СНИИГГиМС 1999. С. 17–46.
4. Свешникова Е.В., Семенов Е.И., Хомяков А.М. Заангарский щелочной массив, его породы и минералы. М.: Наука, 1976. 80 с.
5. Федорова А.В. Акцессорная благороднометалльная минерализация в породах Средне-Татарского щелочного массива // Золото Сибири: геохимия, технология, экономика: Материалы IV Междунар. симп. Красноярск: КНИИГГиМС, 2006. С. 77–78.
6. Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B. et al. Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisey Ridge // Tectonophysics. 2003. Vol. 375, № 1/4. P. 147–168.
7. Минералы: Справочник. Т. 5: Каркасные силикаты. Вып. 2: Фельдшпатоиды / Под ред. Г.Б. Бокий, Б.Е. Боруцкого. М.: Наука, 2003. 379 с.
8. Дир У.А., Хауч Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 3: Листовые силикаты / Под ред. В.П. Петрова. М.: Мир, 1966. 318 с.
9. Магматические горные породы: В 6 т. Т. 6: Эволюция магматизма в истории Земли / Под ред. В.И. Коваленко. М.: Наука, 1987. 439 с.
10. Бородин Л.С. Петрохимия магматических серий. М.: Наука, 1987. 264 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 18 октября 2010 г.