

Петрогенезис бокурского вулканоплутонического щелочнобазит-щелочномезитового комплекса Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита по геохимическим и изотопным данным

Полин В.Ф.

Petrogenesis of the alkaline-basitic and alkaline-mesitic volcanoplutonic Bokur complex of the Aldan shield's Ketkap-Yuna magmatic province according to geochemical and isotopic data

Polin V.F.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток;

e-mail: vfpolin@mail.ru

Раннемеловой щелочнобазит-щелочномезитовый бокурский комплекс образован из магм мантийного (базиты) и мантийно-корового (мезиты и салиты) генезиса. Мезиты и салиты происхождением обязаны возникновению, ощелачиванию и десиликации очага кислой магмы под воздействием тепла и флюидов, исходивших от базитового мантийного расплава.

Происхождение протяженных по кремнекислотности комплексов щелочно-базитовых и щелочно-салических пород, как интрузивных, так и эффузивных, издавна привлекает внимание петрологов-магматистов в связи с «необычностью» их минералого-петрографического состава, особенностями физико-химических и геодинамических условий проявления и связанной с ними минерагении. Одним из дискуссионных вопросов до сих пор остается *природа источников* вещества щелочных вулканитов и плутонитов, решение которого возможно только с привлечением результатов детальных петрогеохимических и изотопных исследований. С этих позиций, несомненный интерес представляет щелочнобазит-щелочномезитовый с салитами вулканоплутонический бокурский комплекс [6] Кеткапско-Юнской магматической провинции (ККЮМП) – одной из зон позднемезозойской тектономагматической активизации (ТМА) Алданского щита (АЩ).

В состав этого комплекса, слагающего Бокурский вулканоплутон Улаханского массива ККЮМП, входят щелочнобазитовые до щелочномезитовых и, реже, щелочносалических, вулканические и интрузивные породы, представленные пирокластической (преобладает), лавовой и гипабиссально-дайковой фациями. Вулканогенные породы в последовательности, близкой к антидромной, слагают *три* вулканогенные толщи, выполняющие *Бокурскую и Улаханскую* перекомпенсированные кальдеры. ^{40}Ar – ^{39}Ar и U-Pb возрасты их находятся в пределах 126-124 млн лет [4]. Дайковые и гипабиссальные магматиты близодновременны вулканитам. Наиболее приемлемой геодинамической концепцией становления комплекса признана идея о формировании его в условиях «низковулканического» (по Е.Е. Милановскому) континентального рифтинга, связанного с геодинамической обстановкой скольжения литосферных плит [3, 6 и др.].

С учетом сказанного, цель настоящей работы состоит в определении характерных черт *петрогенезиса* бокурского комплекса с использованием новых петрографических, петрогеохимических данных и опубликованных [5, 7, 8 и др.] результатов изотопно-геохимических исследований его пород. Задачи, которые решались для ее достижения: (1) петрографическая и петрогеохимическая систематики пород; (2) установление возможных источников и путей эволюции материнских расплавов.

Общая петрографическая характеристика. Таксономическое разнообразие пород бокурского комплекса довольно велико (Материалы геолого-съемочных работ (МГСР); работы В.Ф. Полина с соавторами 2001-2023 гг.; и др.). Образован он трахибазальтами, трахибазальтами-мелафоидитами, шошонитовыми базальтами и трахибазальтами, шошонитами, абсарокитами, шонкинитами и эссекситами (петрографически, последние два вида – минетте) нескольких разновидностей,

фонотефритами («тефритовыми трахитами» – в МГСР), щелочными трахитами и тефрифенолитами, в меньшей мере, кислыми щелочными трахитами и щелочными сиенитами. Значительную роль в составе вулканогенных фаций, помимо лав, играют «кластолавы» (МГСР) («интрузивные игнимбрить» – ВП) щелочных и фойд-содержащих базитов и мезитов.

Краткий обзор изотопно-геохимических исследований бокурского комплекса.

Изотопия свинца. Исследования изотопного состава свинца в магматических образованиях бокурского комплекса позволили установить несколько типов источников вещества, принимавших участие в петрогенезисе. Мантийный источник, отождествляемый с источником типа PREMA, фиксируется в большинстве магматических образований, а в мафических породах играет преобладающую роль. Верхнекоровый источник, соответствующий источнику типа «Ороген» или среднему составу континентальной коры, доминирует во многих мезитовых и всех салических породах комплекса. Третьим источником является нижняя кора, но тип нижнекорового протолита, вовлекаемого в магматический процесс, остается неопределенным, затрудняя оценку его роли в петрогенезисе [5].

Изотопия стронция и неодима. Изотопия стронция и неодима в бокурских вулканоплутонитах указывает на возможность образования первичных расплавов щелочных базальтов из источника, близкого РМ или BSE. Для щелочных мезитов и салитов диагностируется смешанный, мантийно-коровый, источник [7].

Изотопия кислорода. Исследование изотопного состава кислорода в щелочных вулканитах и плутонитах бокурского комплекса [7, 8] выявило довольно значимые по размаху колебания величин $\delta^{18}\text{O}$, обусловленные как различиями в генезисе исходных магм, так и вероятным изотопным обменом в магматических и постмагматических условиях. Аномально низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ в бокурских вулканитах и некоторых субвулканитах свидетельствуют о повсеместном взаимодействии магмы с метеорными водами в близповерхностных магматических очагах.

Петрогеохимическая систематика пород; приложение данных петрогеохимии к вопросам петрогенезиса. Вулканоплутониты бокурского комплекса образуют высококальциевую, железистую, метаглиноземистую серию. Лишь некоторые из наиболее кислых его членов слабо перглиноземисты. Петрохимически они классифицируются как лейцитовые фонотефриты, шошониты, тефрифенолиты, щелочные латиты и трахиандезиты, щелочные трахиты и лейцитовые, реже нефелиновые фенолиты. По величине щелочности и щелочно-известковистому индексу (≈ 50) комплекс близок к границе между щелочными и субщелочными сериями. Щелочные мезитовые и салические вулканоплутониты отличаются от щелочных базальтоидов большей общей щелочностью, переводящей фенолиты в разряд высокощелочных образований. Их тип щелочности – натриево-калиевый, низкокалиевый подтип; щелочные базиты и переходные к мезитам разности пород относятся к низко-натриевому подтипу натриево-калиевого типа.

На классификационных диаграммах породы комплекса расположены в полях фельдшпатоидных и бесфельдшпатоидных базальтоидов (габброидов) и фельдшпатоидных и щелочных сиенитов, совпадая с эволюционными трендами калиевой щелочно-базитовой серии лейцитит–щелочно-сиенитовой формации зон ТМА АЩ. Наблюдаемое на диаграмме «Rb-Sr» Г.Б. Ферштатера [9] положение составов бокурских вулканоплутонитов в области, характерной для «магматических пород стабильных зон, субплатформенных стадий развития подвижных зон, заложенных на континентальной коре», согласуется с геологической позицией комплекса и также указывает на калиевую щелочно-базальтовую магму как родоначальную для его пород.

На диаграмме «Rb/Sr-Sr» М.Г. Руб–В.М. Даценко [1] распределение бокурских вулканоплутонитов близко тренду типовых рифтогенных комплексов континентов. Отсутствие закономерного увеличения Rb/Sr отношения в ряду «основные–средние

породы» на диаграмме «SiO₂-Rb/Sr» свидетельствует об отсутствии процесса *фракционирования полевых шпатов* при становлении всей серии образований комплекса. В то же время, распределение фигуративных точек его вулканоплутонитов на диаграммах «SiO₂-Ni; Cr; Mg» указывает на возможность формирования мезитовых и салических пород за счет щелочнобазитовой магмы путем фракционной кристаллизации железо-магнезиальных силикатов и железо-титанистых оксидов.

В микроэлементном составе для большей части вулканоплутонитов специфичны высокие содержания Ba и Sr, что позволяет отнести их к латитовому геохимическому типу, связанному, как принято считать, с *надплюмовым* либо *рифтогенным* магматизмом (работы Л.В. Таусона, Г.Б. Ферштатера, В.В. Ярмлюка; и др.). В распределении редких элементов обращает на себя внимание высокая фракционированность по крупноионным литофилам и LREE, при практическом отсутствии фракционирования по HREE, отрицательные ниобий-танталовые аномалии, умеренные и низкие содержания рубидия, титана и элементов его группы, при нередко повышенных значениях величин Zr/Nb, Ba/La, La/Ta, Th/Nb, La/Yb, K/Nb; то есть, наблюдаются характеристики, обычно относимые к так называемым *надсубдукционным*.

Топология спайдерграмм лантаноидов *близка* у большинства разноосновных вулканоплутонитов, свидетельствуя об их происхождении из *единого* или близких по составу источников. Очень показательное отсутствие у большей части пород европиевого минимума и высокая фракционированность по легким РЗЭ, при слабом фракционировании по тяжелым, что обычно характерно для *тоналит-трондьемитовых* ассоциаций, производных формации «серых гнейсов», и указывает в нашем случае на контаминированность бокурских вулканоплутонитов веществом земной коры.

На диаграммах Nb-Nb/La, Zr/Nb-Y/Nb, ENd_(t)-Nb/La, Nb/Y-SiO₂ фигуративные точки бокурских вулканоплутонитов занимают области «сильно контаминированных базальтов» [10 и ссылки в ней]. Моделирование по РЗЭ (диаграммы Sm-Sm/Yb, La/Yb-Dy/Yb, La/Sm-Sm/Yb, La/Yb-Tb/Yb, La-La/Sm, La/Yb-Ti/Sm) показало, что щелочные базиты комплекса могли образоваться в результате *частичного* плавления карбонатизированного гранат-содержащего перидотитового источника. Систематика микроэлементов и изотопов также согласуется с происхождением базитовых щелочных расплавов бокурского комплекса в результате декомпрессионного плавления обогащенного источника в астеносферной мантии. Признаки мантийного и мантийно-корового происхождения бокурских щелочных базитов, мезитов и салитов отчетливо проявлены на диаграмме Ce/Y-La/Nb. О наличии граната в остаточном мантийном субстрате свидетельствуют спайдерграммы микроэлементов и прямая корреляция в бокурских породах отношений La/Y и Nd/Y.

Из приведенных фактов вытекает закономерный вывод о *гибридном* характере геохимических характеристик пород изученного комплекса. С одной стороны, им присущи некоторые специфические черты латитовых серий, с другой – образований континентальных вулканических дуг. С учетом того, что такое же распределение редкоземельных и некогерентных элементов отмечается для *калиевых основных и ультраосновных пород и других* регионов Земли, можно заключить о некоем *едином* механизме формирования подобных магматических серий.

Возможные модели становления бокурского комплекса. Набор изотопных и петрогеохимических признаков пород, при учете геологической ситуации и материалов геофизических исследований, позволил предположить, что бокурский комплекс образован из магм мантийного (базиты) и мантийно-корового (мезиты и салиты) происхождения. Щелочнобазитовые составы, исходя из их положения на моделях глубинного магмообразования (диаграммы Н.Л. Добрецова, О.Г. Сафонова, Ж.А. Федотова, S.F. Foley, A. Rosental с соавторами), были продуктами *глубокого мантийного уровня*. Формирование щелочных мезитов и салитов увязывается с

разномасштабным избирательным усвоением корового материала высокотемпературными флюидизированными базитовыми мантийными магмами в процессе их подъема к поверхности. Для их образования принята модель *флюидного синтексиса*, в понимании [2], предусматривающая возникновение, последующее ощелачивание и десиликацию очага вторичной кислой магмы под воздействием потока тепла и флюидов, исходивших от внедрившегося в земную кору высокотемпературного мантийного расплава. Согласно этой модели, состав возникающего «синтексического» расплава будет близок составу, образуемому при *кристаллизационной дифференциации* соответствующей мантийной выплавки, но *более щелочным* за счет притока щелочей в зону силификации мантийной магмы и гораздо более обильным – за счет корового материала.

В рамках предложенной модели находят объяснение многие из особенностей позднемезозойского щелочного вулканоплутонизма в пределах Кеткапско-Юнской провинции и других магматических провинций зон ТМА Алданского щита.

Исследования выполнены согласно теме № 2 государственного задания Дальневосточного геологического института ДВО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. *Даценко В.М.* Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы // *Материалы Второго Всероссийского петрографического совещания*. Сыктывкар, 2000. Т. 2. С. 270-274.
2. *Добрецов Г.Л., Добрецов Н.Л.* К проблеме генезиса щелочно-салических пород // *Геология и геофизика*. 1983. № 1. С. 69-74.
3. *Полин В.Ф.* Петрогеохимические критерии геодинамической обстановки формирования бокурского щелочнобазит-щелочномезитового комплекса Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита // *Физика геосфер: Тринадцатый Всероссийский симпозиум, 11-15 сентября 2023 г., Владивосток, Россия: материалы докладов*. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2023. С. 187-192.
4. *Полин В.Ф., Глебовицкий В.А., Мицук В.В. и др.* Двухэтапность становления щелочной вулканоплутонической формации в Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита: новые данные изотопной периодизации // *Доклады Академии наук*. 2014. Т. 459. № 1. С. 67-72.
5. *Полин В.Ф., Дриль С.И., Ханчук А.И. и др.* Вариации изотопного состава свинца в полиформационных магматитах Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита как свидетельство мантийно-корового взаимодействия // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 468. № 5. С. 566-571.
6. *Полин В.Ф., Сахно В.Г.* Петрогенезис щелочных вулканитов Кеткапско-Юнской магматической провинции Алдана // *Доклады Академии наук*. 2004. Т. 394. № 3. С. 364-367.
7. *Полин В.Ф., Ханчук А.И., Мицук В.В. и др.* Источники мезозойского полиформационного магматизма Кеткапско-Юнской магматической провинции Алдана: изотопные данные // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 448. № 2. С. 181-187.
8. *Полин В.Ф., Яковенко В.В.* Изотопы кислорода и происхождение щелочных магматогенных комплексов Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита // *Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. VII Всероссийская конференция с международным участием, Владивосток, 15-18 сентября 2025 г.: материалы конференции*. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2025. С. 160-164.
9. *Феритатер Г.Б.* Rb-Sr – диаграммы для анализа геодинамического режима образования магматических серий // *Ежегодник-1980: Информационные материалы*. Свердловск, 1981. С. 86-88.
10. *Xia L.Q., Li X.M.* Basalt geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting // *Gondwana Research*, 2019. V. 65. P. 43-67. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.08.006>