

УДК 552.11

## ЭТАПЫ ГРАНИТОИДНОГО МАГМАТИЗМА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЗАХСТАНСКОГО СОСТАВНОГО КОНТИНЕНТА В РАННЕМ-СРЕДНЕМ ПАЛЕОЗОЕ

© 2024 г. П. Д. Котлер<sup>1,2,\*</sup>, С. В. Хромых<sup>1</sup>, академик РАН К. Е. Дегтярев<sup>3</sup>,  
А. В. Куликова<sup>1,2</sup>, М. Д. Царева<sup>1</sup>, В. А. Пенкина<sup>1</sup>

Поступило 03.05.2024 г.

После доработки 09.05.2024 г.

Принято к публикации 13.05.2024 г.

Для северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента Бошекуль-Чингизской складчатой области были впервые получены U–Pb-оценки возраста среднепалеозойских гранитоидных комплексов, а также описаны их геохимические особенности. Новые данные свидетельствуют о широком распространении на этой территории гранитоидов позднего силура, представленных породами I-типа. Породы раннего девона формируют ряд отдельных вулканоплутонических структур, гранитоиды которых могут быть отнесены к А-типу. Особенности состава гранитоидов, формировавшихся на протяжении кембрия–девона, позволяют проследить эволюцию коры этой части Чингиз-Тарбагатайского сегмента от энсиматической островной дуги к вулканическому поясу с относительно зрелой корой континентального типа.

*Ключевые слова:* гранитоиды, эволюция земной коры, Восточный Казахстан

**DOI:** 10.31857/S2686739724090016

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство этапов эволюции складчатых областей (субдукционный, коллизионный, внутриплитный) сопровождаются формированием гранитоидов различных геохимических типов. Выделение этапов гранитоидного магматизма позволяет получить информацию об основных эпизодах развития орогенов, а геохимические особенности дают возможность составить представление о строении коры, составе субстратов и условиях их плавления. Регион исследований располагается в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1), и рассматривается в составе раннепалеозойской Бошекуль-Чингизской складчатой области, состоящей из трёх

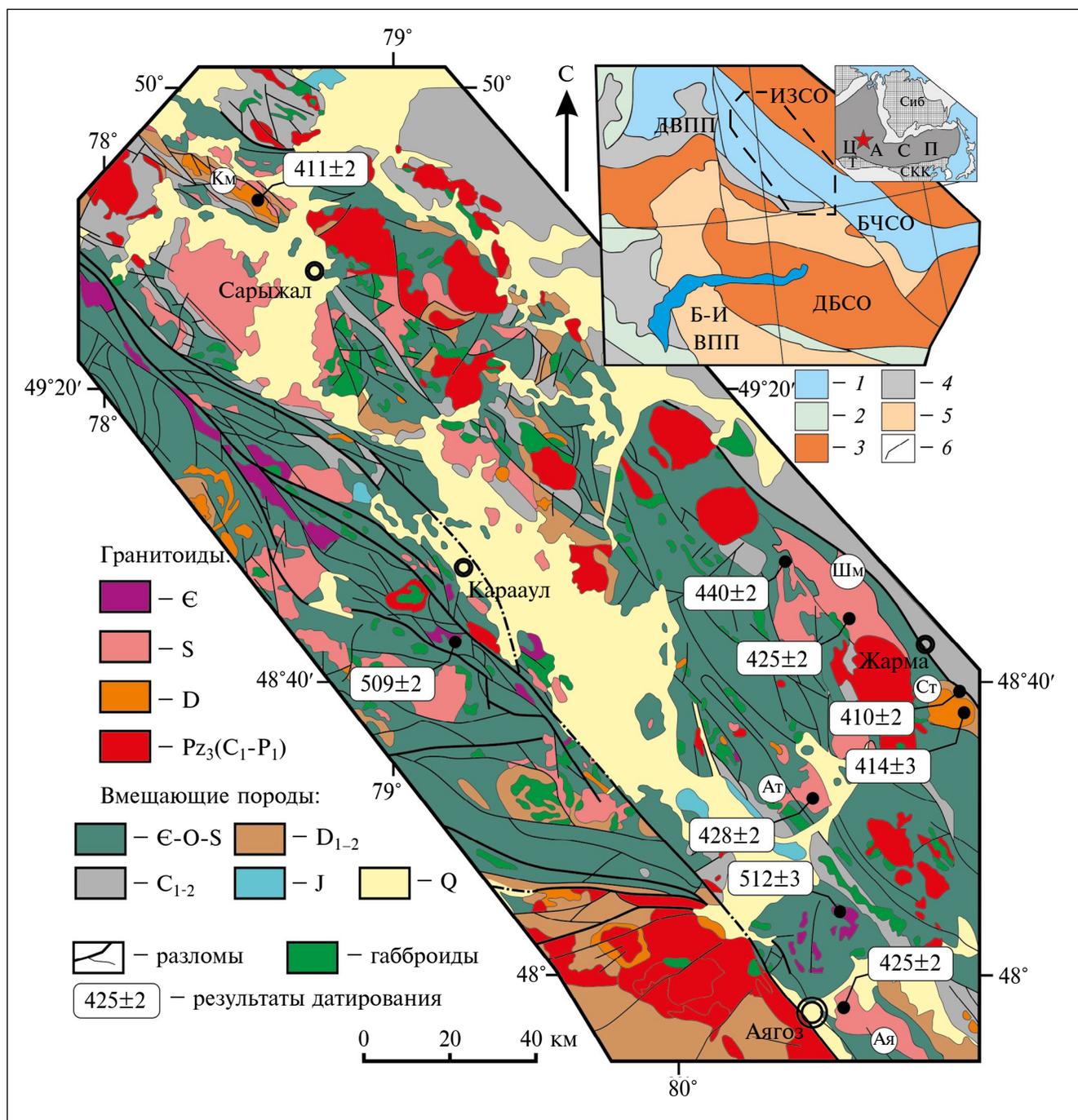
сегментов — Селетинского, Бошекульского и Чингиз-Тарбагатайского [3]. Отличительной особенностью этой области является широкое распространение нижнепалеозойских островодужных комплексов. Конкретным полигоном исследований являлась северо-восточная часть Чингиз-Тарбагатайского сегмента. В этом районе широко распространены различные гранитоиды, прорывающие вулканические и вулканогенно-осадочные толщи, для которых в большинстве случаев отсутствуют данные об их возрасте и составе, полученные современными прецизионными методами. На этом полигоне нами были проведены широкомасштабные работы по U–Pb-геохронологическому изучению магматических комплексов, преимущественно гранитоидов и вмещающих кислых вулканитов, и получены новые данные по составу петрогенных и редких элементов. На основе этих результатов выделены основные этапы формирования континентальной коры, сопровождавшиеся гранитоидным магматизмом и сделаны предположения о геодинамических обстановках формирования гранитоидов.

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Казанский федеральный университет,  
Казань, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт Российской Академии наук,  
Москва

\*E-mail: pkotler@igm.nsc.ru



**Рис. 1.** Геологическая схема северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента. Схема составлена на основе [2] с авторскими изменениями. В кружках подписаны массивы, изученные в работе: Км — Кельмембет, Шм — Шереметьевский, Ст — Сарытау, Ат — Агаштыенрекейский, Ая — Аягозский. На врезке — положение полигона исследований на схеме тектонического районирования палеозоид Казахстана и Северного Тянь-Шаня по [3]: 1 — Бошекуль-Чингизская складчатая область (БЧСО); 2 — Кокчетав-Северотяньшанская складчатая область; 3 — позднепалеозойские складчатые области, Иртыш-Зайсанская (ИЗСО), Джунгаро-Балхашская (ДБСО); 4 — девонский вулканоплутонический пояс (ДВПП); 5 — Балхаш-Илийский вулканоплутонический пояс (Б-И ВПП); 6 — границы и разломы.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Полигон исследований представляет собой полосу северо-западного простирания шириной около 100 км и протяжённостью более 220 км, локализованную на территории Восточного Казахстана (см. рис. 1). В строении северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента участвуют нижнепалеозойские и силурийские комплексы, которые формировались в процессе эволюции внутриокеанических островных дуг [3]. На северо-востоке полигон исследований ограничен Жарма-Саурской зоны, являющейся составной частью герцинской Иртыш-Зайсанской складчатой области. Западная граница полигона проходит по Чингизскому разлому, представляющему собой региональную сдвиговую зону, разделяющую Чингиз-Тарбагатайский сегмент.

К настоящему времени в сопряжённых регионах юго-западной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента [3, 4], Иртыш-Зайсанской складчатой области [6, 15, 16] и на южном продолжении этих структур в Китае [9, 10, 20] и др.) получен значительный объём современных данных по возрасту и составу магматических комплексов. Однако для магматических образований, рассматриваемого полигона, отсутствуют опубликованные современные геохронологические данные, за исключением работы [12], где описаны только наиболее ранние интрузивы этого района.

Сопоставление схем магматизма рассматриваемого региона, принятых при составлении геологических карт различных поколений и публикаций предшественников, позволяет выделить как минимум три различных схемы [1, 2, 5]. Все они имеют отличия как по возрасту внедрения и объёмам комплексов, так и по названиям этих комплексов. При этом в большинстве случаев возраст формирования того или иного интрузивного комплекса устанавливался по геологическим взаимоотношениям. К ограничениям этого метода относятся отсутствие достоверных сведений о возрасте пород, вмещающих интрузивы, и слабая обнажённость контактов. Как следствие, на многих геологических картах возраст гранитоидов, рассматриваемых в настоящей работе, указывался либо как предполагаемый, либо определялся как средне-поздпалеозойский.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения U–Pb-датирования циркона использовалась система лазерной абляции на основе эксимерного лазера (длина волны 193 нм) Analyte Excite (“Teledyne Cetac

Technologies”), соединенная с квадрупольным масс-спектрометром с ионизацией в индуктивно-связанной плазме ThermoScientific iCAP Q центра Геотермохронологии Казанского федерального университета (КФУ). Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов 5 Гц и плотность энергии лазерного излучения 3.0 Дж/см<sup>2</sup>. Для анализа использовались эталонные образцы циркона: 91500 – контрольный образец (1065 млн лет) и Plešovice – внешний стандарт (337 млн лет). В начале, середине и в конце сессии измерений дополнительно измерялось стандартное синтетическое стекло NIST SRM 612 для учёта чувствительности масс-спектрометра. Обработка масс-спектрометрических данных, учёт коррекций, выбор оптимального участка сигнала, расчёт изотопных отношений (<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U, <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U, <sup>208</sup>Pb/<sup>232</sup>Th) и соответствующих возрастов проводился с помощью программы Iolite 3.65, встроенной в Igor Pro 7. Расчёт средневзвешенных значений возраста по изотопным отношениям, построение диаграмм с конкордией выполнялись в Microsoft Excel со встроенным пакетом Isoplot 4.15. Для расчёта дискордантности применялась формула  $D = 100 * (\text{Возраст}^{(207\text{Pb}/235\text{U})} / \text{Возраст}^{(206\text{Pb}/238\text{U})} - 1)$ . Измерения, где дискордантность < –5% или >5%, исключались из выборки.

Определение химического состава пород проводилось в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Состав породообразующих компонентов определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900XP (“Thermo Fisher Scientific”, Германия) (аналитик Н.Г. Карманова). Концентрации редкоземельных (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) и редких (Rb, Sr, Cs, Ba, Nb, Zr, Y, Hf, Ta, Th, U) элементов были получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на одноколлекторном масс-спектрометре Finnigan Element II (Германия) с предварительным разложением проб путём сплавления с метаборатом лития (аналитик И.В. Николаева).

## РЕЗУЛЬТАТЫ U–Pb-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные U–Pb-геохронологические исследования (табл. 1, рис. 2; табл. 1S;

дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи) позволили в пределах полигона выделить три этапа гранитоидного магматизма: 1) кембрийский (512–509 млн лет); 2) силурийский (428–425 млн лет) 3) девонский (414–409 млн лет).

1) *Кембрийский этап.* Описание и обоснование возраста гранитоидов кембрийского этапа северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента приведено в статье [12]. Породы этого этапа представлены плагиогранитами, тоналитами и кварцевыми диоритами и слагают пояс небольших интрузивов северо-западного простирания вблизи Чингизского разлома. Для пород двух массивов получены U–Pb (ID-TIMS и SIMS)-оценки возраста, примерно соответствующие границе раннего-среднего кембрия (512±3 и 509±2 млн лет).

2) *Силурийский этап.* Получены U–Pb-оценки возраста для пород Аягозского, Агаштыенрекейского и Шереметьевского массивов (см. рис. 1, 2). Аягозский массив расположен в 5 километрах на юго-восток от города Аягоз и представляет собой тело северо-западного простирания размером 7×14 км. Возраст гранитоидов данного массива считался дискуссионным и согласно различным источникам оценивался в интервале от силура до позднего палеозоя. Для гранитов Аягозского массива по 25 точкам получена оценка возраста 425±2 млн лет. Агаштыенрекейский массив расположен в 50 км на север от города Аягоз и представляет собой два

сопряжённых интрузивных тела с диаметрами в 6 и 8 км, соединённых небольшой субширотной перемычкой. Вмещающими породами являются позднеордовикские вулканические толщи, а сами граниты чаще всего рассматривались в составе аягозского комплекса каменноугольного возраста. Для гранитов этого массива по 45 точкам получена оценка возраста 428±2 млн. Шереметьевский массив расположен в 100 км на север от Аягоза, вытянут в северо-западном направлении более чем на 30 км при ширине около 13 км и является самым крупный интрузивом в пределах северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента, который традиционно относился среднему-позднему девону. Вмещающими породами являются метаморфизованные кислые вулканы – дациты, риолиты и их туфы, ранее условно относившиеся к машанской (кайдаульской) свите нижнего девона. Нами для гранитов Шереметьевского массива по 39 точкам получена оценка возраста 425±2 млн лет. Оценки возраста в интервале 428–425 млн лет, полученные для пород Аягозского, Агаштыенрекейского и Шереметьевского массивов, соответствуют верхам венлокского-лудловскому отделам силура. Также были изучены дациты, вмещающие граниты Шереметьевского массива, для которых по 29 точкам получена оценка возраста 440±2 млн лет, примерно соответствующая середине лладоверийского отдела силура, что позволяет относить эти породы к доненжальской свите силура.

**Таблица 1.** Результаты U–Pb-геохронологического изучения пород северо-восточной части Чингиз-Тарабагатайского сегмента

№	Массив	Порода	Координаты	Количество точек	Возраст, млн лет
K23-71	Аягозский	Гранит	47.961836 с. ш. 80.556313 в. д.	24	425.4±1.7
K22-356	Агаштыенрекейский	Гранодиорит	48.39703 с. ш. 80.44704 в. д.	45	427.9±1.8
K22-49	Шереметьевский	Гранит	48.79667 с. ш. 80.58875 в. д.	39	425.2±1.7
K23-77	Шереметьевский, вмещающие породы	Дацит	48.803934 с. ш. 80.538974 в. д.	29	440.3±2.2
K23-6	Кельмембет	Граносиенит	49.736276 с. ш. 78.533441 в. д.	37	411±2.3
K22-3	Сарытау	Лейкогранит	48.61991 с. ш. 80.99895 в. д.	40 (18)	414.3±2.7
K22-13	Сарытау	Риолит	48.62220 с. ш. 81.02251 в. д.	37	409.5±1.5

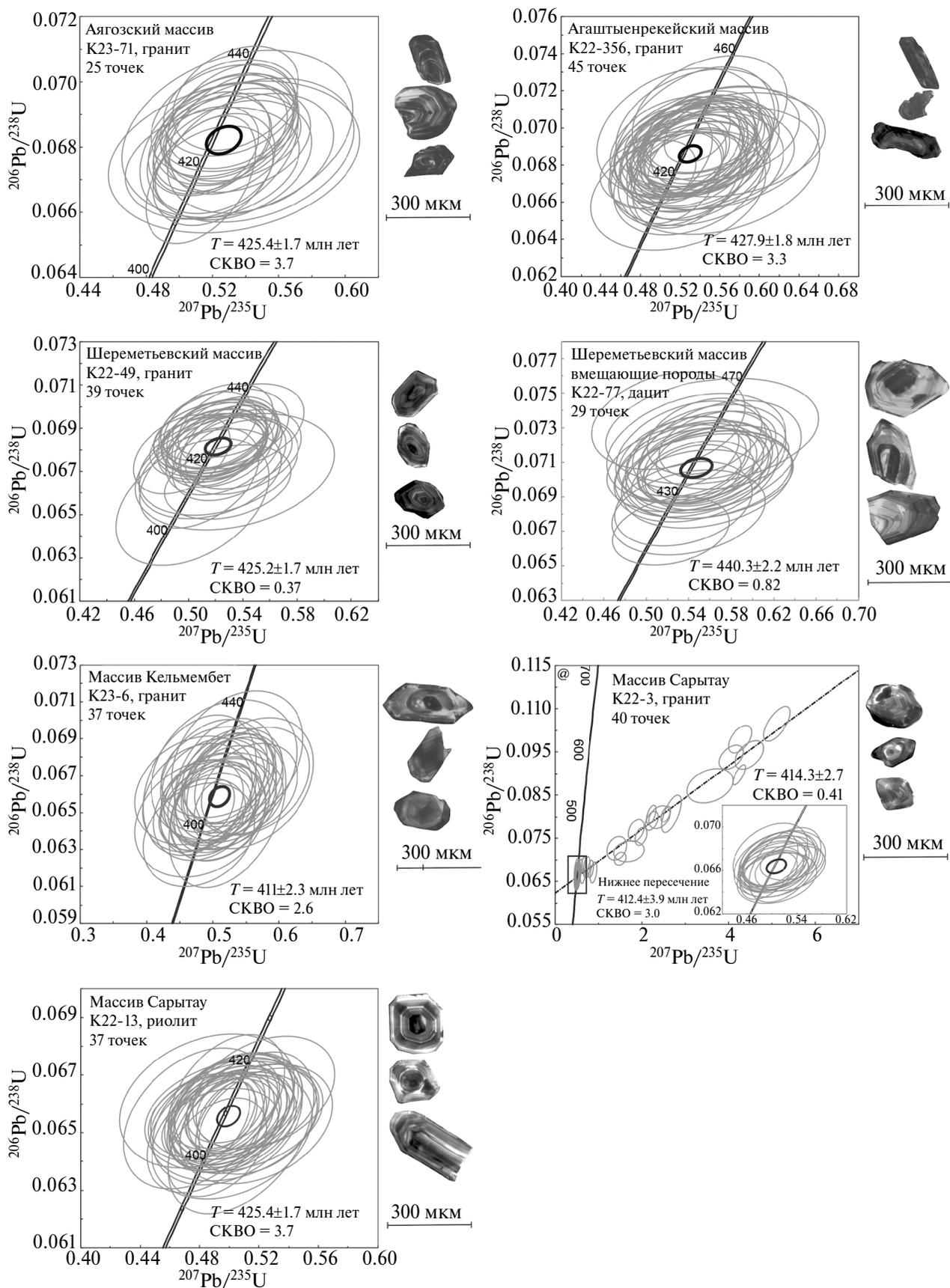


Рис. 2. Диаграммы с конкордией для пород северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента и микрофотографии представительных зёрен циркона, выполненные в режиме катодолуминесценции.

3) *Девонский этап*. Получены U–Pb-оценки возраста для небольших массивов Кельмембет и Сарытау, расположенных на северо-западе и юго-востоке полигона исследований (см. рис. 1, 2). Массив Кельмембет расположен в северо-западной части района исследований и представляет собой линзовидное тело, вытянутое в северо-западном направлении на 25 км при максимальной ширине в 5 км. Вмещающими породами являются кислые вулканиты, относящиеся к нижнему девону, при этом породы самого массива считаются раннепермскими. Для граносиенитов этого массива по 37 точкам получена оценка возраста  $411 \pm 2$  млн лет. Массив Сарытау участвует в строении вулcano-плутонической структуры, расположенной на юго-востоке полигона в 20 километрах на юг от посёлка Жарма. Эта структура образована риолитами, их туфами и игнимбритами кислого состава, которые прорваны интрузивным телом гранитов овальных очертаний размером  $12 \times 6$  км. Возраст гранитов на различных геологических картах принимался каменноугольным или раннепермским. При U–Pb-геохронологическом изучении циркона из 40 экспериментальных точек, только 18 имеют конкордантные оценки возраста —  $414 \pm 3$  млн лет, остальные точки располагаются на линии дискордии с нижним пересечением в  $412 \pm 4$  млн лет. Для вмещающих риолитов по 37 точкам получены оценка возраста  $410 \pm 2$  млн лет. Оценки возраста пород массивов Кельмембет и Сарытау в интервале 414–410 млн лет соответствуют верхам лохковского-низам пражского веков раннего девона.

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ

Для определения основных черт химического состава использовались данные по 28 образцам из силурийских гранитоидов, 22 образцам из девонских пород и 10 опубликованным данным по кембрийским породам по [12]. Полная таблица с составами представлена в дополнительных материалах.

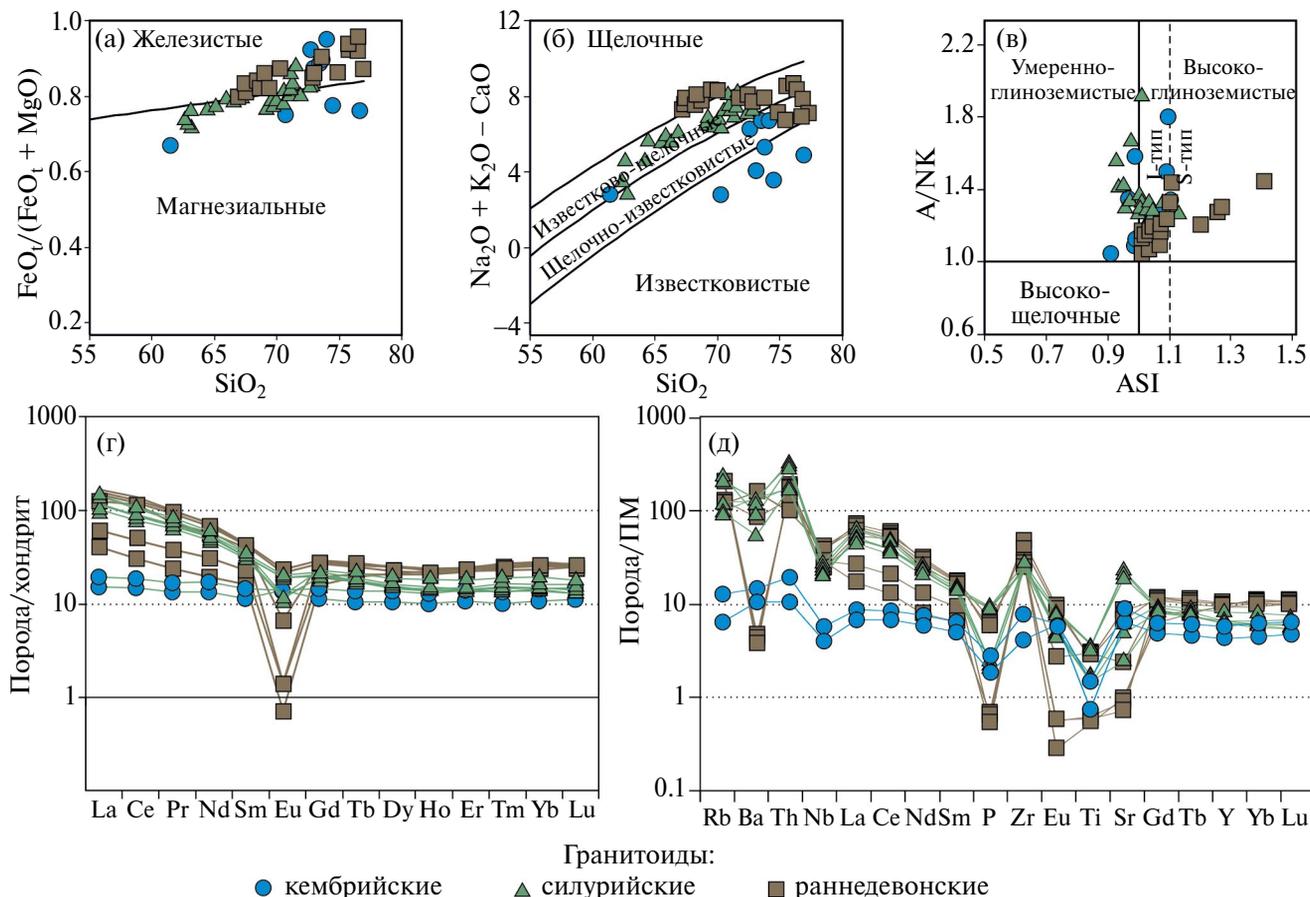
1) *Кембрийский этап*. Гранитоиды данного этапа подробно описаны в работе [12] и приведены на графиках для сравнения. Они представлены преимущественно плагиогранитами, гранодиоритами и кварцевыми диоритами низкокальциевыми, умеренноглинозёмистыми. Их состав соответствует продуктам частичного плавления метабазитов океанической коры, а формирование происходило в пределах энсиматической островной дуги.

2) *Силурийский этап*. Породы данного этапа представлены биотит-роговообманковыми гранитами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами до диоритов с достаточно широкими вариациями  $\text{SiO}_2$  от 62 до 73 мас. %. На диаграммах [14] (рис. 3) эти породы локализуются в полях магнезиальных, щёлочно-известковистых, низко- и умеренноглинозёмистых пород. Данные гранитоиды имеют достаточно высокие содержания щелочей  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  от 4.8 мас. % в диоритах до 9.3 мас. % в гранитах при содержаниях CaO от 1 до 4 мас. %. Породы имеют умеренно фракционированные распределения РЗЭ ( $\text{La}_n/\text{Yb}_n = 7.5\text{--}9.6$ ) и слабовыраженный европиевый минимум ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.47\text{--}0.76$ ). На мультиэлементных спектрах для силурийских гранитоидов характерно наличие минимумов по Nb, P, Ti.

3) *Девонский этап*. Породы этого этапа представлены серией пород от граносиенитов до лейкогранитов ( $\text{SiO}_2 = 66.9\text{--}76.8$  мас. %). Относительно гранитоидов силурийского этапа главными отличительными особенностями пород девона является несколько повышенные содержания щелочей ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) и  $\text{SiO}_2$ . На диаграммах [14] девонские гранитоиды локализуются в полях железистых, щелочных и щёлочно-известковистых, умеренноглинозёмистых пород. Также для этих гранитов характерны менее фракционированные распределения РЗЭ ( $\text{La}_n/\text{Yb}_n = 1.4\text{--}6.4$ ) и глубокие европиевые минимумы ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.04\text{--}0.66$ ). На мультиэлементных спектрах гранитов и лейкогранитов характерны минимумы по Ba, Sr, P, Nb, Ti, для граносиенитов минимум по Ba отсутствует, а остальные отрицательные аномалии менее выражены.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенности химического и минерального состава гранитоидов силурийского возраста позволяют рассматривать их как породы I-типа, согласно “алфавитной” классификации [9, 11, 13]. По составу и возрасту изученные породы соответствуют гранитоидам сарыкольского комплекса, описанного в юго-западной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента, возраст которых устанавливался по геологическим взаимоотношениям [3]. Гранитоиды сарыкольского комплекса образуют крупные батолитовые тела, а их формирование связано с поздними стадиями эволюции островодужных систем. Поскольку подобные батолиты отмечены во всех зонах Чингиз-Тарбагатайского сегмента, вероятнее всего они связаны с процессами амальгамации и отвечают начальному этапу формирования



**Рис. 3.** Особенности состава гранитоидов северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента на диаграммах: (а):  $SiO_2$ — $FeO_{tot}/(FeO_{tot}+MgO)$  [14]; (б):  $SiO_2$ — $MAI$  [14]; (в):  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ — $ASI$ , мол. кол. [14]; (г): на хондрит-нормализованном распределении РЗЭ [8]; (д): на мультиэлементной диаграмме, нормирование на примитивную мантию [18].

Казахстанского составного континента, как единого блока земной коры.

Повышенные щёлочность, железистость и особенности распределения редких элементов позволяют рассматривать изученные раннедевонские гранитоиды как породы А-типа или переходные породы I-A-типа. Подобные породы описаны в юго-западной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента в составе саргалдагского комплекса, возраст которого на основании геологических взаимоотношений принят как ранне-среднедевонский [3]. В настоящее время сложно судить о распространённости пород этого комплекса из-за недостаточного количества геохронологических и геохимических данных в пределах рассматриваемого региона. Характерной чертой строения комплексов этого возраста является их приуроченность к изолированным вулcano-плутоническим структурам, центральные части которых сложены

интрузивными породами, окружённые толщами кислых вулканитов и их туфов — структуры Сарытау и Кельмембет на северо-востоке Чингиз-Тарбагатайского сегмента и Машанская структура — на юго-западе. Геодинамическая обстановка формирования гранитоидов раннедевонского этапа является предметом дискуссий. С одной стороны, особенности их состава могут указывать на внутриплитные обстановки магматизма, возможно, связанные с участками растяжения в пределах сдвиговых зон. С другой стороны, в девонское время предполагается наличие субдукционной зоны с погружением океанической плиты под Казахстанский континент со стороны Джунгаро-Балхашского океана и формированием окраинно-континентального Девонского вулcano-плутонического пояса. Поэтому можно предполагать, что описанные в данной работе девонские комплексы формировались в тыловых частях этого пояса наиболее удалённых от зоны субдукции. Однако, следует

учитывать, что в настоящее время отсутствуют опубликованные геохронологические данные, доказывающие широкое распространение раннедевонских вулканических пород, маркирующих активную окраину Казахстанского составного континента. Возраст этих комплексов определяется на основании их положения в разрезе и находок остатков флоры раннедевонского и эйфельского возраста. Возможно, что ряд вулканических толщ, возраст которых не имеет палеонтологического обоснования, ошибочно рассматривается в качестве раннедевонских. Однако два рассматриваемых механизма не являются взаимоисключающими, и, возможно, что внедрение раннедевонских интрузивов являлось результатом формирования участков растяжения в пределах сдвиговых зон на фоне субдукционных процессов.

Положение полей составов кембрийских, силурийских и раннедевонских пород на диаграммах для реконструкции геодинамических условий формирования гранитоидов [17, 19], а также особенности химического состава позволяют проследить эволюцию источников для данного участка земной коры (рис. 4). Кембрийские породы локализируются в поле гранитоидов энзиматических островных дуг. Силурийские гранитоиды за счёт более высоких содержаний крупноионных литофильных компонентов (Rb) попадают в поле пород энзиматических субдукционных зон или магматитов аккреционно-коллизии событий. Раннедевонские гранитоиды имеют более высокие содержания высокочarged элементов

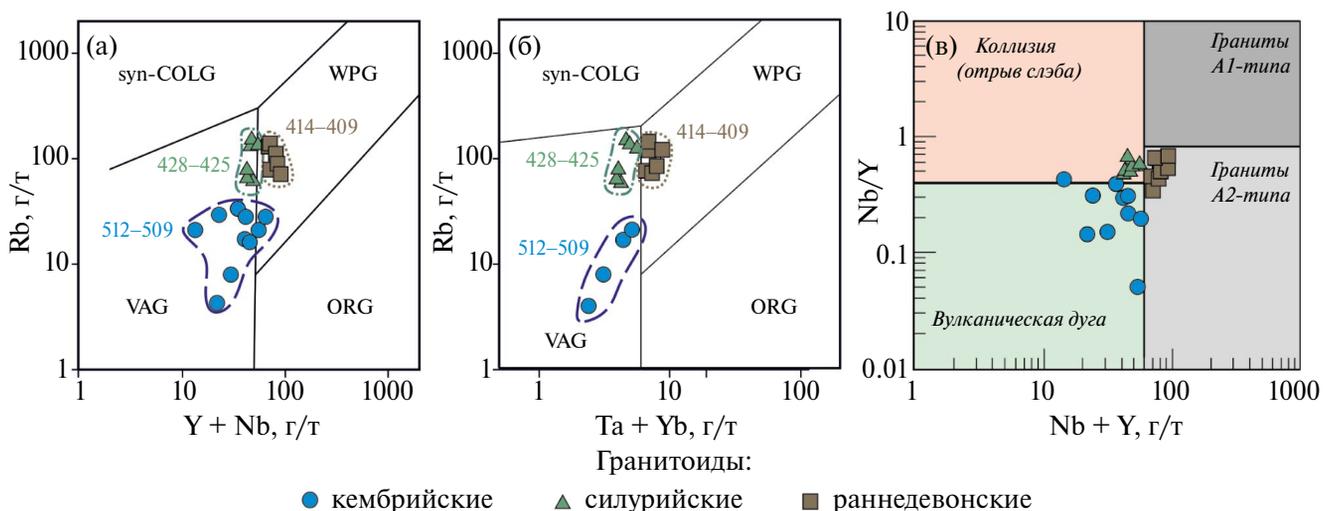
(Ta, Nb, Yb), что приводит к их локализации в поле внутриплитных пород. Подобные изменения состава гранитоидов Чингиз-Тарбагатайского сегмента во времени являются отражением эволюции земной коры складчатой области от раннепалеозойской энзиматической дуги к вулканическому поясу с достаточно зрелой земной корой в среднем палеозое.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены за счёт Российского научного фонда, проект № 22-77-00061, а также в соответствии с планами Государственного задания ИГМ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая карта Казахской ССР. Масштаб 1:500000. Восточно-Казахстанская серия. Объяснительная записка. Алма-Ата: Мингео СССР, 1979. 184 с.
2. Геологическая карта Казахстана. Масштаб 1:1000000. Составители: Р.А. Сегедин (западная часть), Ю.М. Ким (северная), Р.М. Антонюк, М.С. Гранкин (центральная), И.А. Ротараш (восточная), И.К. Краснобородкин (южная). 10 листов. 1998.
3. *Дегтярев К.Е.* Тектоническая эволюция раннепалеозойских островодужных систем и формирование континентальной коры каледонид Казахстана. М.: ГЕОС, 2012. 289 с.



**Рис. 4.** Состав гранитоидов северо-восточной части Чингиз-Тарбагатайского сегмента на геодинамических диаграммах: а) Rb — (Y+Nb) [17]; б) Rb — (Ta+Yb) [17]; поля VAG — граниты вулканических дуг, syn-COLG — граниты коллизии орогенов, WPG — внутриплитные граниты, ORG — граниты океанических хребтов; в) Nb/Y — (Nb+Y) [19].

4. *Дегтярев К. Е., Шатагин К. Н., Ковач В. П., Третьяков А. А.* Процессы формирования континентальной коры каледонид хребта Чингиз (Восточный Казахстан) // Геотектоника. 2015. № 6. С. 20–51.
5. Отчет о результатах геологического доизучения масштаба 1:200 000 на площади листов М-44-XXVI, М-44-XXXII и М-44-XXXIII по работам 2010–2012 гг. ТОО “ГРК “Топаз”, 2012. Книга I. 263 с.
6. *Хромых С. В.* Базитовый и сопряженный гранитоидный магматизм как отражение стадий развития Алтайской аккреционно-коллизонной системы (Восточный Казахстан) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 3. С. 330–355.
7. *Boynnton W. V. et al.* Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
8. *Chappell B. W., White A. J. R.* Two contrasting granite types // Pac. Geol. 1974. V. 8. P. 173–174.
9. *Chen J. F., Han B. F., Ji J. Q., Zhang L., Xu Z., He G. Q., Wang T.* Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, north Xinjiang, China // Lithos. 2010. 115. P. 137–152.
10. *Chen J. F., Han B. F., Zhang L., Xu Z., Liu J. L., Qu W. J., Li C., Yang J. H., Yang Y. H.* Middle Paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the West Junggar (NW China): constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemisitai-Saier Mountains // J. Asian Earth Sci. 2015. 113. P. 90–109.
11. *Collins W. J., Beams S. D., White A. J. R., Chappell B. W.* Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia // Contrib. Mineral. Petrol. 1982. 80. P. 189–200.
12. *Degtyarev K. E., Luchitskaya M. V., Tret'yakov A. A. et al.* The Oldest Island-Arc Granitoids of the Chingiz–Tarbagatai Region, Eastern Kazakhstan: Substantiation of the Age and Peculiarities of Composition // Dokl. Earth Sc. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24600919>
13. *Eby G. N.* Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geology. 1992. V. 20. P. 641–644.
14. *Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D.* A geochemical classification for granitic rocks // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 2033–2048.
15. *Khromykh S. V., Kotler P. D., Kulikova A. V., Semenova D. V., Minnebaev K. R., Gareev B. I., Batalin G. A., Antsiferova T. N., Il'icheva E. A., Volosov A. S.* Early Triassic Monzonite–Granite Series in Eastern Kazakhstan as a Reflection of Siberian Large Igneous Province Activity // Minerals. 2022. 12(9). (1101). <https://doi.org/10.3390/min12091101>
16. *Kotler P. D., Khromykh S. V., Kruk N. N., Sun M., Li P., Khubanov V. B., Vladimirov A. G., Semenova D. V.* Granitoids of the Kalba batholith, Eastern Kazakhstan: U-Pb zircon age, petrogenesis and tectonic implications // Lithos. 2021. V. 388–389. Art. № 106056.
17. *Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G.* Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol. 1984. V. 25. № 4. P. 956–983.
18. *Sun S.-S., McDonough W. F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. 1989. V. 42. P. 313–345.
19. *Whalen J. B., Hildebrand R. S.* Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks // Lithos. 2019. V. 348–349. № 105179.
20. *Zhang C., Santosh M., Liu L. F., Luo Q., Zhang X., Liu D. D.* Early Silurian to Early Carboniferous ridge subduction in NW Junggar: evidence from geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic data on alkali granites and adakites // Lithos. 2017. 300–301. P. 314–329.

## STAGES OF GRANITOID MAGMATISM IN THE EASTERN PART OF THE KAZAKHSTAN COMPOSITE CONTINENT IN THE EARLY-MIDDLE PALEOZOIC

**P. D. Kotler<sup>a,b,#</sup>, S. V. Khromykh<sup>a</sup>, Academician of the RAS K. E. Degtyarev<sup>c</sup>,  
A. V. Kulikova<sup>a,b</sup>, M. D. Tsareva<sup>a</sup>, V. A. Penkina<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: pkotler@igm.nsc.ru*

For the northeastern part of the Chingiz-Tarbagatai segment of the Boshchekul-Chingiz folded area, U-Pb age estimates of Middle Paleozoic granitoid complexes were obtained for the first time, and their geochemical features were described. New data indicate a wide distribution of Late Silurian granitoids, represented by I-type rocks, in this territory. Early Devonian rocks form a number of separate volcano-plutonic structures, the granitoids of which can be classified as A-type. The compositional features of granitoids formed during the Cambrian-Devonian allow us to trace the evolution of the crust of this part of the Chingiz-Tarbagatai segment from an ensimatic island arc to a volcanic belt with relatively mature continental-type crust.

*Keywords:* granitoids, evolution of the Earth's crust, Eastern Kazakhstan