

«Источники и тектонические обстановки формирования песчаников из палеозойских аккреционных комплексов Палеоазиатского океана по данным геохимии и цирконометрии»

Сафонова И.Ю., руководитель, Перфилова А.А., аспирант

Аннотация

Проект нацелен на изучение граувакковых и турбидитовых песчаников из аккреционных комплексов западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) для расшифровки палеозойской эволюции Палеоазиатского океана и его активных окраин. В соответствии с планом работ по проекту в течение первого года была проведена работа с имеющейся коллекцией песчаников центрального и восточного Казахстана (Итмурундинская и Жарминская зоны соответственно) и Киргизского Тянь-Шаня, отобранных во время полевых работ 2017-2019 гг. Были изучены геологическое положение песчаников в разрезе отложений стратиграфии океанической плиты и преддуговых бассейнов Казахстана и Киргизии, петрографический и химический состав песчаников, обработаны имеющиеся аналитические данные по U-Pb возрасту детритовых цирконов в них и аналитические данные по концентрациям породообразующих и редких элементов и изотопному составу Sm-Nd по породе и Lu-Hf в цирконах. Установлено две группы песчаников. Для первой группы характерен преимущественно граувакковый состав, соответствующий их образованию в условиях нерасчленённой и переходной дуги, унимодальное распределение U-Pb возрастов детритовых цирконов, химический состав близкий к валовому составу андезибазальтов и андезитов из тех же аккреционных комплексов, положительные значения ϵ_{Nd} по породе и ϵ_{Hf} в цирконах. Для них предложено образование за счет разрушения магматических пород внутриокеанических дуг Палеоазиатского океана в течение всего палеозоя. Для второй группы характерен преимущественно граувакковый и литаренитовый состав, соответствующий их образованию в условиях смешанной и/или расчленённой дуги и рециклированного орогена, полимодальное распределение U-Pb возрастов детритовых цирконов, химический состав близкий к валовому составу андезитов и дацитов, низкие до отрицательных значения ϵ_{Nd} по породе и ϵ_{Hf} в цирконах. Для них

предложено образование за счет разрушения магматических пород активных континентальных окраин Палеоазиатского океана в среднем и позднем палеозое.

Аспирант приняла участие в экспедициях на аккреционных комплексах Казахстана и Киргизии, выступила с докладами на 3-х научных конференциях: (1) XXXI молодёжная научная школа-конференция, посвящённая памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии", Санкт-Петербург, ИГГД РАН, октябрь 2020; (2) XXXII молодёжная научная школа-конференция, посвящённая памяти член-корр. АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии", Петрозаводск, ИГ КНЦ РАН, октябрь 2021; (3) 53-е Тектоническое совещание «Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы - 2022», Москва, ГИН РАН, февраль 2022.

Подготовлено пять публикаций: 1) опубликованы тезисы «Источники и тектонические обстановки формирования терригенных пород Итмурундинского аккреционного комплекса (северное Прибалхашье, центральный Казахстан)» в материалах XXXI молодёжной научной школы-конференции, посвящённой памяти член-корр. АН СССР К.О. Кратца "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии"; 2) опубликована статья по геологии, геохимии и цирконометрии песчаников Жарма-Саурской и Чарской зон восточного Казахстана в журнале International Journal of Earth Sciences (Q1 по Scopus); 3) опубликованы тезисы «Цирконометрия, химический и изотопный состав песчаников Чарской и Жарминской зон восточного Казахстана: корреляция, источники и тектонические обстановки» в материалах XXXII молодёжной научной школы-конференции, посвящённой памяти член-корр. АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии"; (4) опубликована статья «Тектонические обстановки образования вулканических и осадочных пород Итмурундинской зоны центрального Казахстана» в журнале Геодинамика и Тектонофизика (Q3 по Scopus); (5) опубликованы тезисы «Геологическое положение и вещественный состав терригенных пород Алайского хребта (Киргизия, Южный Тянь-Шань)» в материалах 53-го Тектонического совещания (см. список публикаций в конце отчета).

Полученные результаты

За два года реализации проекта изучены обломочные осадочные породы - граувакковые песчаники из турбидитов Итмурундинской и Жарминской зон центрального

и восточного Казахстана (соответственно) и Алайского хребта Южного Тянь-Шаня Киргизии, образованные на конвергентных окраинах тихоокеанского типа Палеоазиатского океана в течение всего палеозоя (рис. 1). Детально изучены взаимоотношения пород, входящих в состав этих аккреционных комплексов: вулканических пород, океанических осадков (пелагические кремни, хемипелагические кремнистые осадки, турбидиты глубоководного желоба), граувакковых песчаников; построены геологические разрезы и литологические колонки (Перфилова и др., 2020; Safonova et al., 2021). Изучен петрографический состав пород. Для определения возраста пород, являвшихся источником осадочного материала, а также соотношения разновозрастных комплексов в питающей провинции проведено U-Pb датирование цирконов методом масс-спектрометрии на индуктивно связанной плазме с лазерной абляцией (ЛА ИСП МС). Для вещественной характеристики песчаников определены концентрации породообразующих окислов (рентген-флуоресцентный анализ - РФА) и редких элементов (масс-спектрометрия на индуктивно связанной плазме - ИСП МС). Для получения усреднённой изотопной характеристики источников сноса детритового материала проведен анализ изотопного Sm-Nd состава осадков (мульти-коллекторная масс-спектрометрия) и анализ соотношений изотопов Lu-Hf в цирконах.

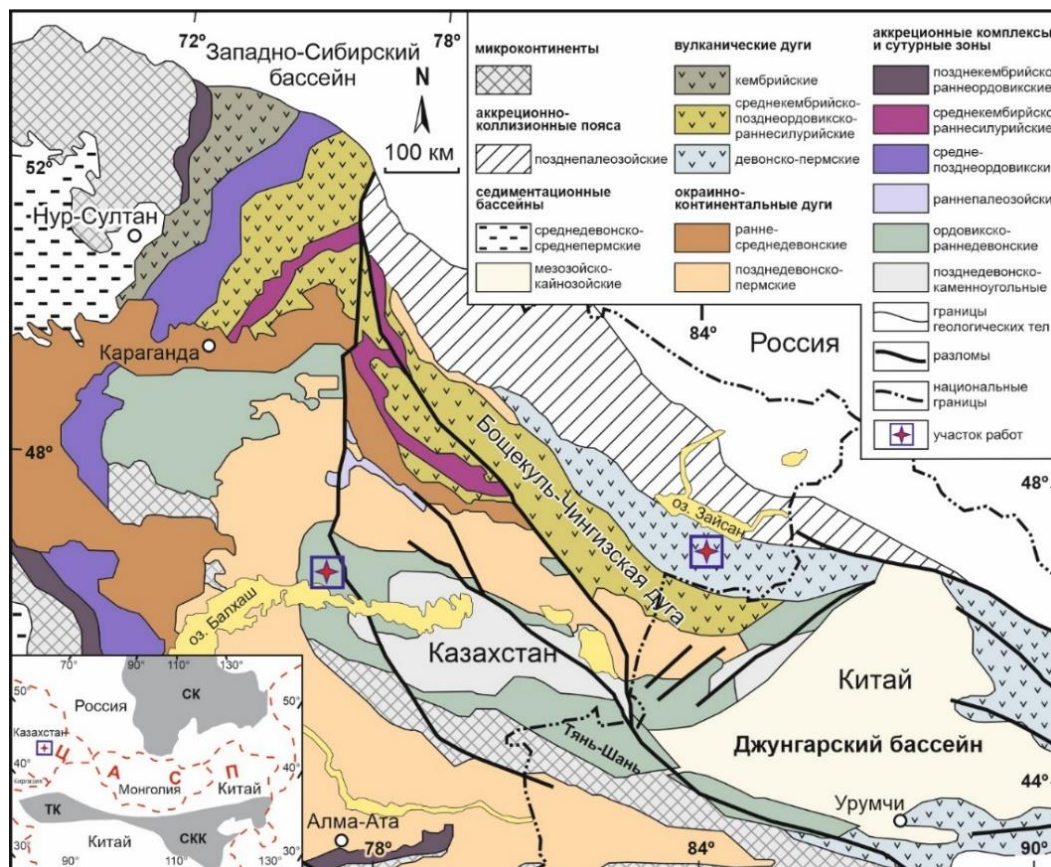


Рис. 1. Тектоническая карта северо-западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса по (Windley et al., 2007). СК – Сибирский кратон, ТК – Таримский кратон, СКК – Северо-Китайский кратон.

Результат 1

Итмурундинская зона расположена в центральном Казахстане и протягивается более чем на 80 км вдоль северного побережья оз. Балхаш. Она относится к западному сегменту ЦАСП и находится в пределах северо-восточной части Джунгаро-Балхашской складчатой системы (ДБСС) [Дегтярев, 1999; Windley et al., 2007; Alexeiev et al., 2011]. В составе Итмурундинской зоны принято выделять офиолитовый пояс, аккреционный комплекс, метаморфический пояс и меланж, содержащий блоки осадочных и магматических пород [Степанец, 2015; Сафонова и др., 2019; Safonova et al., 2020; Degtyarev et al., 2021]. Аккреционный комплекс содержит в себе ассоциацию пород СОП [Isozaki et al., 1990]: базальты (MORB, OIB), пелагические (ленточные кремни) и гемипелагические (кремнистые алевролиты, аргиллиты, сланцы) осадки, терригенные породы (песчаники и гравелиты). Традиционно в пределах Итмурундинского АК выделяется три свиты: итмурундинская (O₂), казыкская (O₂₋₃) и тюретайская (O_{3-S1}) [Геологическая..., 1960; Паталаха, Белый, 1981] (рис. 2).

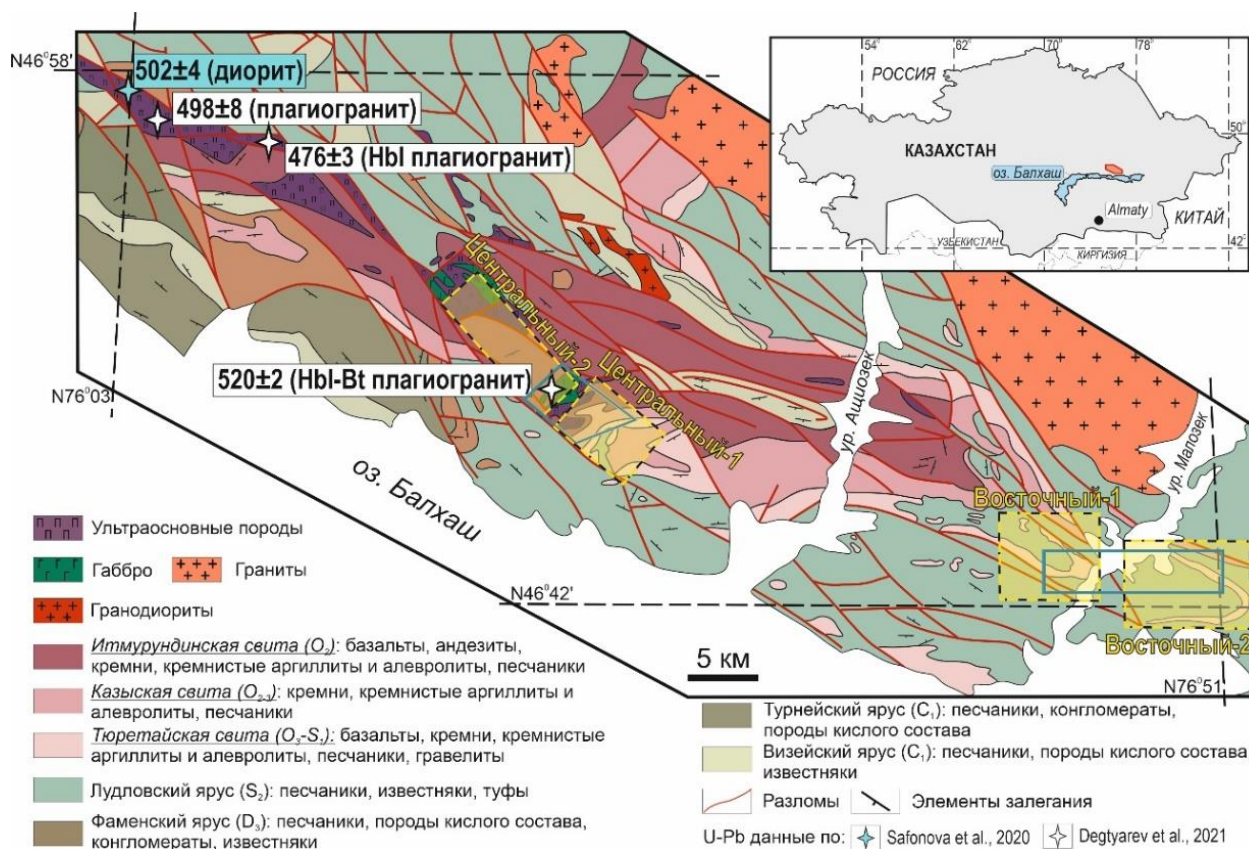


Рис. 2. Фрагмент геологической карты СССР, масштаб 1:200000, Серия Прибалхашская, лист L-43-XI (1960). Составители: В. Я. Кошкин, В. В. Галицкий, Южно-Казахстанское геологическое управление Министерства геологии и охраны недр СССР.

Итмурундинская свита состоит из эффузивных пород основного-среднего состава, кремнистых аргиллитов и алевролитов, и мелко-среднезернистых песчаников. Ранне-среднеордовикский возраст свиты определён по конодонтам в ленточных кремнях [Новикова и др., 1983; Degtyarev et al., 2020] и кремнистых туффитах из толщи базальтов [Degtyarev et al., 2020]. В составе казыкской свиты преобладают красноцветные ленточные кремни в ассоциации с кремнистыми аргиллитами и алевролитами. Магматические и обломочные породы содержатся в подчиненном количестве. Средне-позднеордовикский возраст свиты определён по конодонтам в красных ленточных кремнях [Новикова и др., 1983; Сафонова и др., 2019; Degtyarev et al., 2020]. Тюретайская свита сложена базальтами, кремнями, кремнистыми алевролитами и аргиллитами, перекрытыми мощной толщей переслаивающихся брекчий, разнозернистых полимиктовых и мономиктовых песчаников и гравелитов. Среднеордовикский-раннесилурийский возраст свиты определен по конодонтам в кремнях [Новикова и др., 1983; Degtyarev et al., 2020] и граптолитам из алевролитов [Zhylkaidarov, 1998]. В ходе экспедиционных работ 2017-2019 гг. нами было выделено 4 основных участка (рис. 2): Центральный-1, Центральный-2, Восточный-1, Восточный-2.

Для Итмурундинской зоны получены результаты U-Pb датирования детритовых цирконов для 8 образцов песчаников. Для всех зерен цирконов (из всех комплексов/зон) характерна осцилляторная и секториальная зональность, призматическая, бочонковидная, реже округлая форма. Прозрачные или желтовато-охристые зерна размером от 40 до 200 мкм. Значения Th/U находятся в интервале от 0.04 до 2.25. Из 125 проанализированных цирконов, выделенных из образцов It-03-17 и N1965 (участок Центральный-1), получено 87 конкордатных значений в пределах $\pm 5\%$. Возрастной интервал варьирует от 428 до 536 млн лет. Распределение возрастов цирконов на гистограмме имеет унимодальный характер с главным пиком на 467 млн лет (рис. 3А), что предполагает их образование за счет разрушения внутриокеанических дуг и накопление в преддуговом бассейне. Возраст самого молодого циркона – 428 млн лет, самого древнего – 536 млн лет. Для трех образцов с участка Центральный-2 (It-67-17, N1956, It-93-18) также проанализировано 125 зерен цирконов, из которых 92 показало конкордатные значения в пределах $\pm 5\%$. Распределение возрастов на гистограмме – унимодальное с пиком около 456 млн лет (рис. 3Б). Возраст самого молодого циркона – 440 млн лет, самого древнего – 504 млн лет.

Для двух образцов песчаников (It-29-17, It-29-18), отобранных с одного разреза на участке Восточный-1, проанализировано 120 зерен, из которых 92 показали конкордантность выше 95%. Характер распределения возрастов цирконов – полимодальный с главным пиком 461 млн лет и самым молодым цирконом – 424 млн лет

(рис. 3В). Более древние возрастные кластеры разбиваются на несколько интервалов: 617-808 (n=6), 895-1169 (n=13), 2344-2603 (n=9) млн лет и единичные значения на 1378, 1639, 1720, 1890, 2089 млн лет. Для образца 17081704 с участка Центральный-2 получено 78 конкордатных значений в интервале с 456 до 3406 млн лет. Распределение возрастов цирконов – полимодальное с главными пиками на 456 и 992 млн лет (рис. 3Г). Все полученные данные можно разделить следующие интервалы: 456-487 (n=14), 824-998 (n=19), 1000-1142 (n=9), 1589-1734 (n=5), 2421-2501 (n=13) млн лет и единичные отметки 2688, 2826, 2929, 3406 млн лет.

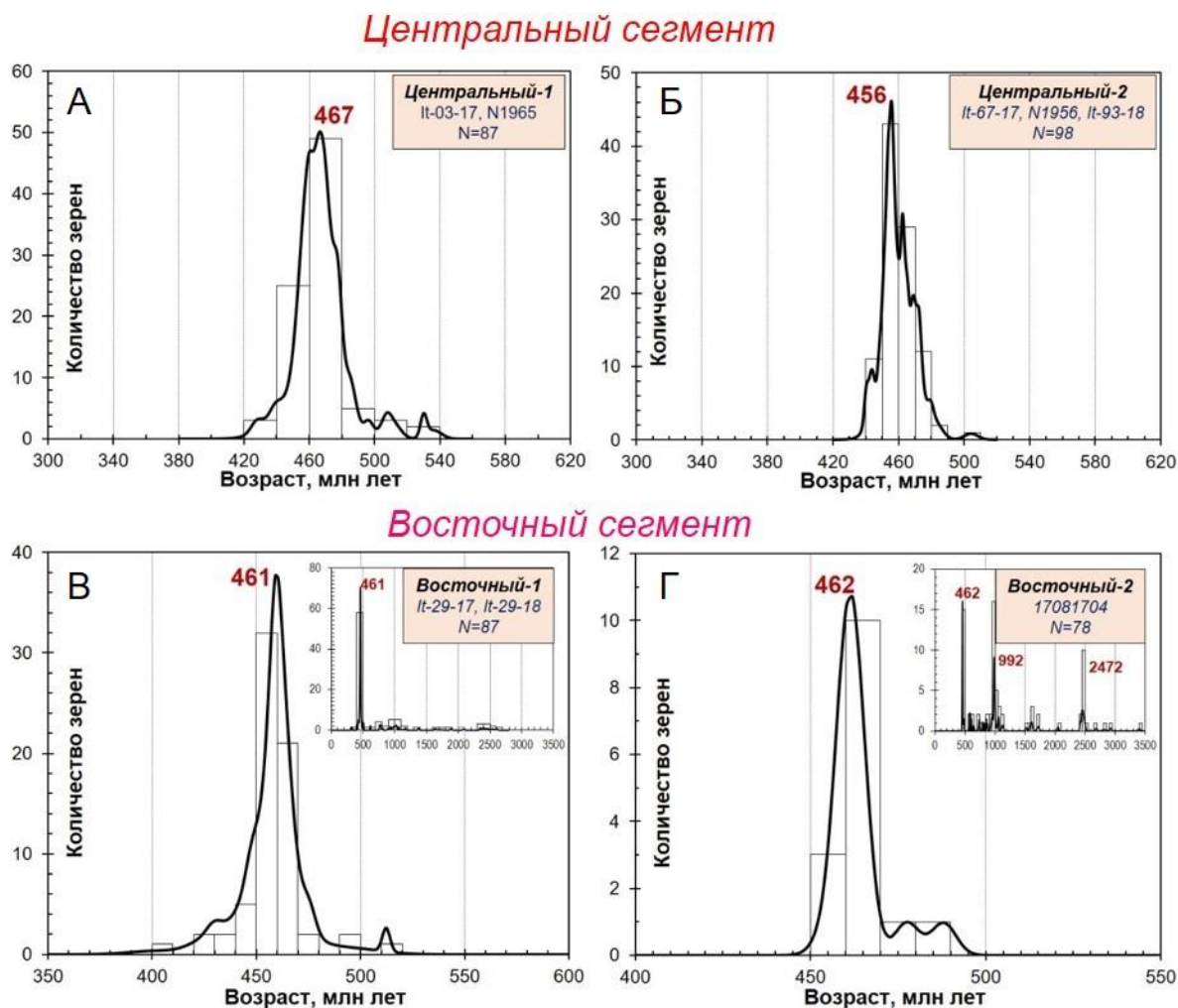


Рис. 3. Гистограммы и кривые распределения U-Pb возрастов детритовых цирконов из песчаников Итмурундинской зоны.

Серые и зеленовато-серые песчаники Центрального сегмента *Итмурундинской зоны* - мелко-среднезернистые, состоят из неокатанных до полуокатанных обломков магматических пород среднего и основного состава (0.2-0.8 мм), кремнистых осадков (0.2-0.7 мм), плагиоклаза (0.1 - 0.8 мм) и кварца (0.1 - 0.3 мм). Степень сортировки – низкая (50-60 %). Обломки вулканических пород имеют гиалопилитовую, интерсертальную, микролитовую, пойкилофитовую структуру. Обломки осадочных пород представлены

кремнями и кремнистыми аргиллитами. Вторичные изменения представлены процессами хлоритизации и сосюритизации. Акцессорные минералы - циркон, эпидот, слюды. Для песчаников характерно отсутствие цемента и низкое содержание кварца (до 8 %). Матрикс сложен тонкозернистым материалом, по составу схожим с составом обломков.

Средне-крупнозернистые песчаники с Восточного сегмента, тёмно-серые, плохо сортированные. Обломки магматических и осадочных пород - плохо- и полуокатанные. Обломки магматических пород - основного состава, имеющие гиалопилитовую структуру, и кислого состава, предположительно дациты. Обломки осадочных пород представлены кремнями или кремнистыми аргиллитами. Для этих песчаников характерно повышенное содержание кварца (до 55 %). Вторичные изменения - хлоритизация и сосюритизация. Акцессорные минералы - циркон, турмалин, оксиды железа, слюды. На треугольниках Q-Fs-L (кварц – полевые шпаты – обломки пород) [Шутов, 1967; Folk, 1980] показано, что точки составов с Центрального сегмента расположены в полях граувакк, полевошпатовых граувакк и литаренитов, с Восточного сегмента в области полевошпат-кварцевых граувакк и полевошпатовых литаренитов (рис. 4А, Б).

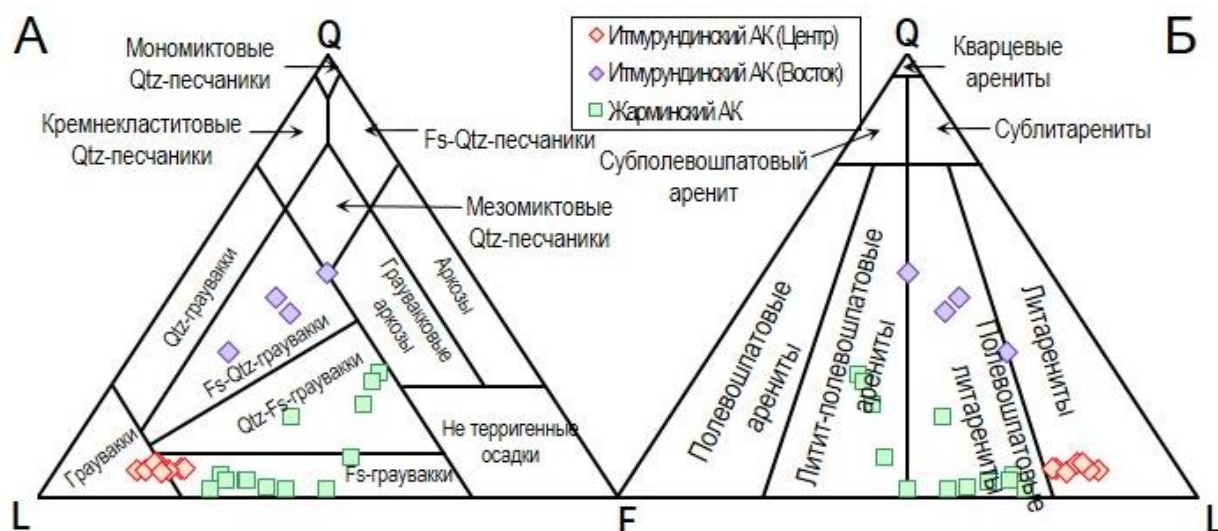


Рис. 4. Треугольники Q-F-L, построенные по содержанию основных петрографических компонентов (Q – кварц, F – полевые шпаты, L обломки пород), по [Шутов, 1967] (А) и [Folk et al., 1980] (Б).

Геохимические особенности песчаников Центрального и Восточного сегментов охарактеризованы по 22 химическим анализам породообразующих оксидов и редких элементов. Содержания оксидов меняются в широких диапазонах: $SiO_2=58.1-74.6$, $TiO_2=0.5-1.3$, $Al_2O_3=8.8-16.6$, $Fe_2O_3=4.1-10.2$, $MgO=1.1-4.9$ мас. %. Для некоторых образцов отмечаются содержания MgO выше 3 мас. %, что указывает на наличие в области сноса магматических пород основного состава [Taylor, McLennan, 1985]. Относительно PAAS во всех изученных песчаниках отмечаются пониженные содержания Al_2O_3 и повышенные

Fe₂O₃ и MgO. При этом для пород Центрального сегмента характерны более высокие значения Fe₂O₃ (ср. 6.7 мас. %) относительно Восточного (ср. 5.9 мас. %), что подразумевает наличие в источнике сноса пород основного-среднего составов. На классификационной диаграмме Петтиджона [Pettijohn et al., 1972] (рис. 5А) точки составов пород расположены в области граувакк и литаренитов. Низкие значения SiO₂/Al₂O₃ и повышенные Na₂O/K₂O в граувакках связано с преобладанием Na-плагиоклаза над K-полевыми шпатами и K-слюдами. Пониженное содержание щелочей с более высоким отношением SiO₂/Al₂O₃ характерно для литаренитов.

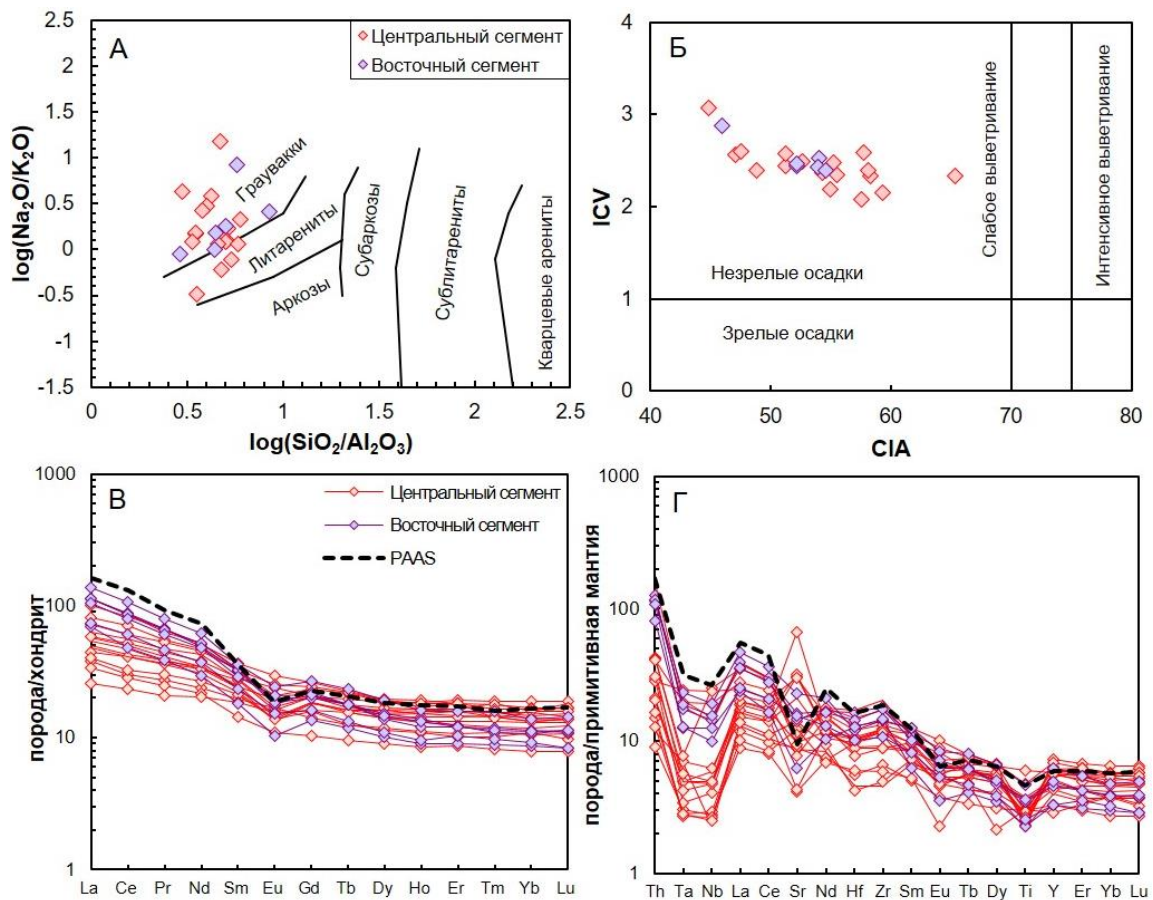


Рис. 5. А) Классификационная диаграмма для песчаников по [Pettijohn et al., 1972]; Б) Диаграмма химических индексов CIA-ICV [Cox et al., 1995; Nesbitt, Young, 1982]; В) Нормированные по хондриту кривые распределения РЗЭ; Г) Мульти элементные спектры для песчаников Итмурундинской зоны. Нормирование по [Sun, McDonough, 1989], PAAS по [Taylor, McLennan, 1985].

Для определения особенностей состава и степени изменения пород в источниках сноса были использованы индексы CIA (индекс химического выветривания) [Nesbitt, Young, 1982] и ICV (индекс зрелости осадков) [Cox, Lowe, 1995]. Индекс CIA характеризует сильное (CIA > 70) и слабое (CIA < 70) выветривание пород. В изученных породах CIA варьирует от 57 до 74, что свидетельствует о низкой степени выветривания (рис. 5Б). Индекс ICV варьирует в диапазоне от 1 до 1.91, что указывает на незрелые осадки с высоким

содержанием неглинистых силикатных минералов (полевые шпаты, амфиболы, пироксены). Зрелые глинистые породы характеризуются значениями $ICV < 1$.

Для песчаников Центрального сегмента характерны повышенные значения некоторых петрохимических модулей: $ЖМ = 0.44-1.31$, $ТМ = 0.04-0.1$, $ФМ = 0.12-0.42$, по которым можно судить о наличии пирогенных и вулканических пород основного состава. Дополнительным обоснованием является их положительная корреляция между собой ($ФМ-ТМ$, $ЖМ-ТМ$) ($r = 0.22$, $r = 0.94$). Значение $ЩМ = 1.1-3.8$ характерно для пирокластических пород базальтового и андезибазальтового состава. Для песчаников Восточного сегмента наблюдаются в целом пониженные относительно Центрального значения петрохимических модулей: $ЖМ = 0.64-0.94$, $ТМ = 0.04-0.06$, $ФМ = 0.13-0.22$ и повышенные содержания $ЩМ = 0.9-8.5$. По этим значениям можно предположить наличие в области сноса вулканических и пирокластических пород основного-среднего состава.

На бинарных диаграммах отмечаются отрицательные тренды по TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 с ростом SiO_2 , что характерно для надсубдукционных магматических серий. Спектры распределения нормированных по хондриту РЗЭ для всех песчаников ниже уровня PAAS, хотя характеры их распределения в целом схожи (рис. 5B). На спектрах отмечается слабое обогащение лёгкими лантаноидами ($La_N = 29-136$, $La/Yb_N = 2.4-10.4$, $La/Sm_N = 1.6-3.8$) и дифференциация в области тяжёлых ($Gd/Yb_N = 1.1-2$). При этом спектры РЗЭ Центрального сегмента расположены ниже относительно песчаников Восточного сегмента. Мультикомпонентные спектры, нормированные по примитивной мантии, в целом, схожи для изученных пород и PAAS, но концентрации для последнего выше. Спектры для песчаников Центрального сегмента отличаются от PAAS наличием минимума по Th. На всех спектрах наблюдаются отрицательные аномалии по Nb ($Nb/La_{pm} = 0.2-1$, $Nb/Th_{pm} = 0.1-0.8$) (рис. 5Г).

Получены первые данные по изотопному составу Nd для образцов песчаников из Центрального и Восточного сегмента. Исходные изотопные отношения были пересчитаны на среднеордовикский возраст (461 и 465 млн лет), полученный по данным U-Pb датирования детритовых цирконов. Образцы Центрального сегмента характеризуются отношениями $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1422-0.1509$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.5125-0.5128$ соответственно. Они имеют положительные значения $\epsilon Nd(t) = +0.99$, $+3.96$, $+5.29$, $+6.56$ с модельными возрастaми $T_{DM2} = 1136$, 886 , 778 и 669 млн лет. Образцы с Восточного сегмента характеризуются более низкими значениями $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1243-0.1300$ и $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.5120-0.5122$ и отрицательным значением $\epsilon Nd(t) = -7.52$, -7.2 , -3.92 с модельными возрастaми 1835, 1800 и 1537 млн лет (рис. 6A).

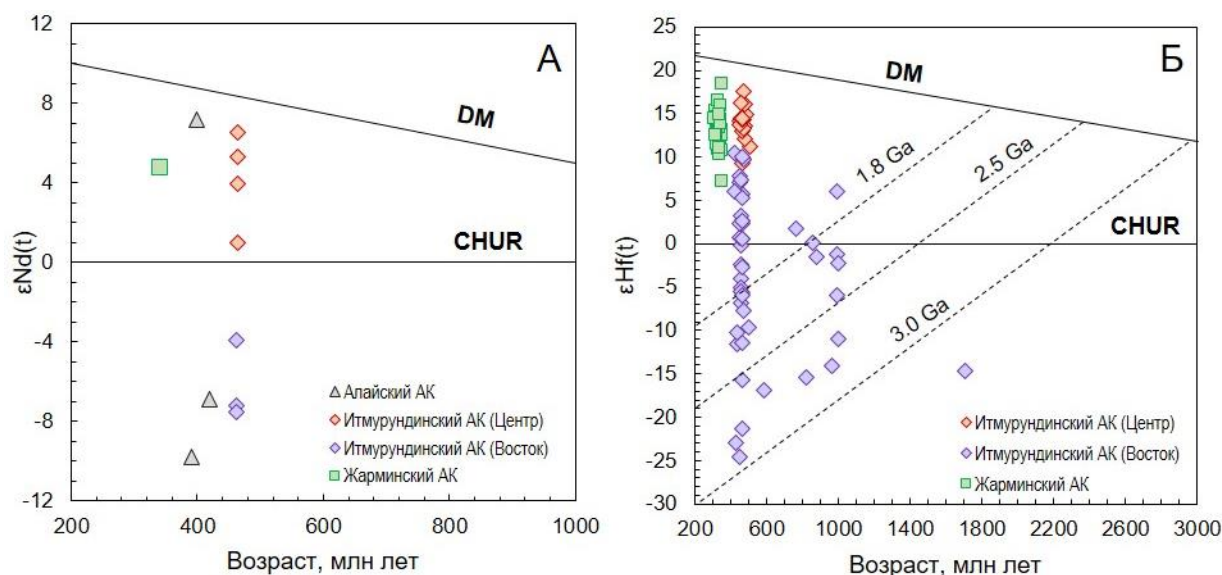


Рис. 6. Графики изотопного состава $\epsilon\text{Nd}(t)$ по валовому составу породы (А) и $\epsilon\text{Hf}(t)$ в цирконах (Б).

Изотопный состав Lu-Hf в цирконах был получен для 64 точек в пяти образцах (рис. 6Б). В трех образцах с Центрального сегмента отмечаются только резко положительные значения $\epsilon\text{Hf}(t)$, распределенные в диапазоне от +9.2 до +14.9 с модельными возрастами $T_{\text{DM}2}$ от 854 до 511 млн. лет. В образцах с Восточного сегмента зафиксированы большие разбросы значений $\epsilon\text{Hf}(t)$ от -24.5 до +10.5 с модельными возрастами $T_{\text{DM}2}$ от 3060 до 690 млн. лет.

Граувакковые песчаники Центрального сегмента, ассоциирующие с осадочными породами океанического происхождения и имеющие унимодальное распределение U-Pb возрастов цирконов, положительные значения ϵNd_i и Hf_i , вероятно были образованы за счёт разрушения внутриокеанической дуги. Граувакковые песчаники Восточного сегмента с полимодальным распределением U-Pb возрастов цирконов и отрицательным значением ϵNd_i образовались, скорее всего, в задуговом бассейне с участием материала, сносимого с континентальной дуги. Таким образом, эти две группы песчаников могли образоваться за счет разрушения либо единой островной дуги, снос с которой происходил в преддуговом (Центральный сегмент) и задуговом (Восточный сегмент) бассейнах, либо двух сосуществующих систем вулканических дуг – внутриокеанической и окраинно-континентальной [Перфилова и др., 2020, 2022а].

Результат 2

Жарминская или Жарма-Саурская зона расположена в восточном Казахстане, в западной части ЦАСПа, в месте взаимодействия активных окраин Казахстанского и Сибирского континентов [Buslov et al., 2001] (рис. 7). Она имеет сложную структуру, включающую террейны разнообразного геодинамического происхождения, среди которых

широко распространены вулканогенно-осадочные, магматические и метаморфические комплексы. Среди них комплексы ультраосновных и основных пород офиолитов, тектонических и серпентинитовых меланжей, океанические и надсубдукционные вулканические породы, коллизионные и пост-коллизионные гранитоиды.

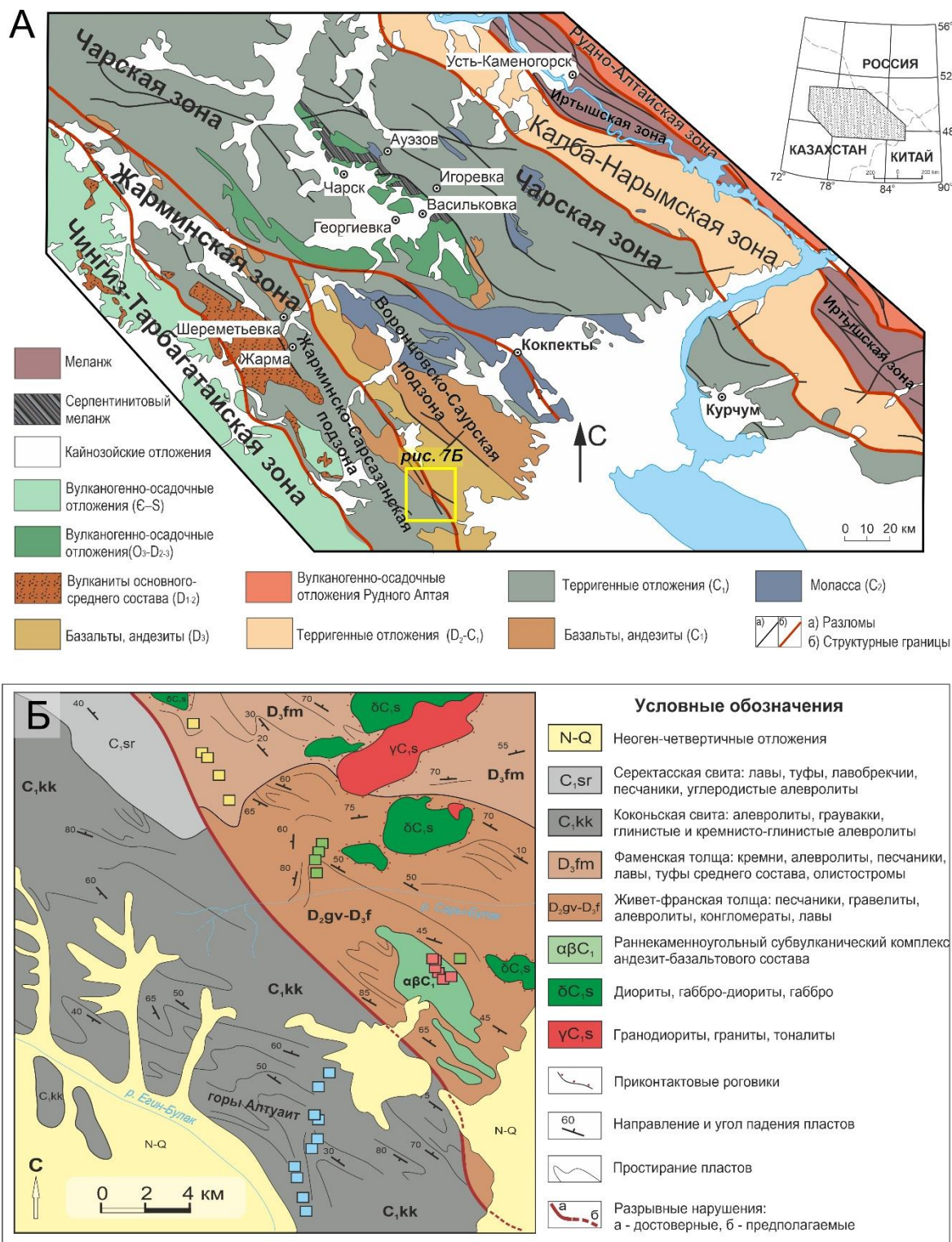


Рис. 7. Фрагмент геологической схемы восточного Казахстана по [Хромых, 2020] с изменениями (А) и фрагмент геологической карты М-44-XXXIV, масштаб 1:200000 [Геологическая..., 2014] с точками отоборования, отмеченными квадратными символами (Б).

В Жарминской зоне отбирались образцы терригенных пород для U-Pb датирования детритовых цирконов. Отобранные образцы пород были обработаны и проанализированы. Нами получены первые данные по составу главных оксидов и редких элементов, первые данные по U-Pb возрасту цирконов и первые данные по изотопному составу Sm-Nd и Lu-Hf в цирконах [Safonova, Perfilova et al., 2021; Перфилова и др., 2021]. На изученных участках терригенные породы представлены песчаниками, в том числе турбидитовыми, и алевропесчаниками. Часть терригенных пород представляет собой граувакки, т.к. они имеют тёмный цвет и плохую сортировку. Проведено петрографическое изучение терригенных пород [Safonova, Perfilova et al., 2021]. Среди обломков присутствуют осадочные, метаморфические и вулканические породы и туфы. Это является диагностическим признаком граувакк, т.к. они образуются на склонах вулканических островных дуг. Образцы близки по петрохимическому составу к дацитам и обогащены калием, натрием и алюминием. Из песчаников были выделены цирконы, продатированные U-Pb методом. Проанализировано 76 зерен циркона из грауваккового песчаника, отобранного в северной части Жарминской зоны, из которых 65 показали относительно хорошую конкордантность в пределах $\pm 5\%$. Возрастной интервал цирконов от 445 до 301 млн лет. U-Pb распределение возрастов также унимодальное с максимумом 340 млн лет. Самый молодой возраст - 301 млн лет. В целом, унимодальное распределение U-Pb возраста обломочного циркона из песчаников Жарма-Саурской зоны характеризуется пиком на 340 млн лет (рис. 8).

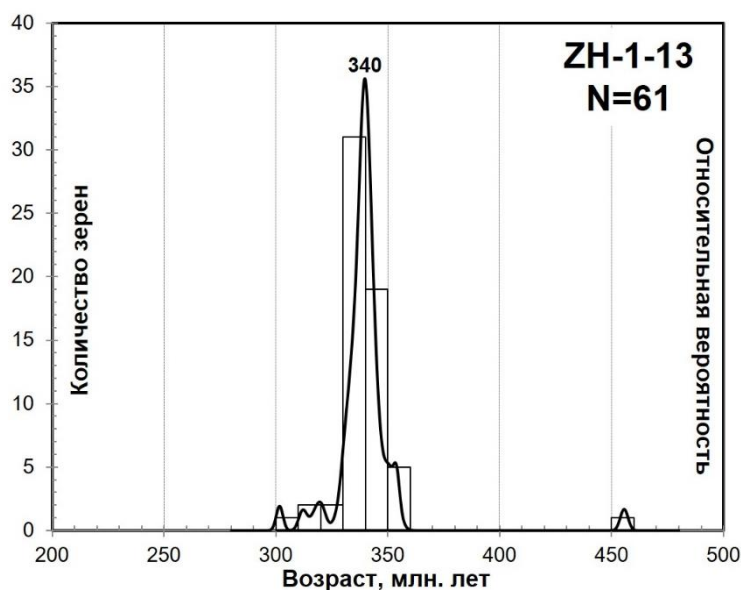


Рис. 8. Гистограмма и кривая распределения U-Pb возрастов детритовых цирконов из песчаника Жарма-Саурской зоны.

Темно-серые и зеленовато-серые песчаники - плохо сортированные, мелко-среднезернистые. Обломочная часть состоит из вулканических пород основного/среднего состава (20-50%), полевого шпата (5-10%), кварца (15-30%) и осадочных пород (кремни, кремнистые алевролиты/аргиллиты; 10-15%), погруженных в тонкодисперсный алевритовый матрикс. Доля матрикса менее 10%. В обломках вулканических пород преобладают лейсты плагиоклаза и темный мезостази́с (вероятно, вулканическое стекло). Обломки и зерна плагиоклаза часто сосюритизированы. Акцессорные минералы - циркон, биотит, магнетит и кальцит. Согласно треугольникам Q-F-L [Шутов, 1967; Folk, 1980] песчаники соответствуют полевошпатовым и кварц-полевошпатовым грауваккам и литаренитам (рис. 4).

Состав порообразующих оксидов и редких элементов охарактеризован для 19 образцов песчаников. Концентрации оксидов меняются в широких диапазонах: $\text{SiO}_2 = 51.6-69.9$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3-13.4$, $\text{MgO} = 0.8-2.7$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.4-20.7$, $\text{Na}_2\text{O} = 3-7$, $\text{K}_2\text{O} = 0.1-3.9$ мас. %. Относительно PAAS отмечаются пониженные содержания Al_2O_3 и повышенные Fe_2O_3 , MgO и Na_2O . По классификации Петтиджона [Pettijohn et al., 1972] все породы соответствуют грауваккам (рис. 9А). Значения химических индексов $\text{CIA} = 36-69$ и $\text{ICV} = 2.4-3.6$ определяют изученные песчаники как незрелые слабо выветрелые осадки (рис. 9Б). Для песчаников отмечаются повышенные значения $\text{ЖМ} = 0.3-1.6$, $\text{ТМ} = 0.04-0.06$, $\text{ФМ} = 0.1-0.3$ и их положительная корреляция: $\text{ФМ}-\text{ТМ} = 0.8$, $\text{ЖМ}-\text{ТМ} = 0.8$. Значения НМ в интервале от 0.17 до 0.40 указывают на принадлежность к граувакковым песчаникам.

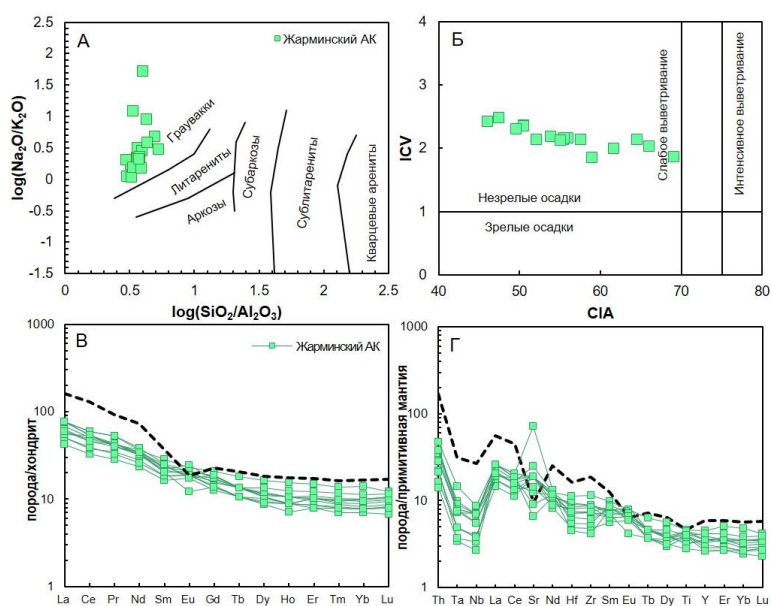


Рис. 9. А) Классификационная диаграмма для песчаников по [Pettijohn et al., 1972]; Б) Диаграмма химических индексов CIA-ICV [Cox et al., 1995; Nesbitt, Young, 1982]; В) Нормированные по хондриту кривые распределения РЗЭ; Г) Мульти элементные спектры для песчаников Жарминской зоны. Нормирование по [Sun, McDonough, 1989], PAAS по [Taylor, McLennan, 1985].

На бинарных диаграммах SiO_2 – породообразующие оксиды проявлены отрицательные тренды по TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 . На спектрах РЗЭ песчаники имеют более низкие концентрации легких лантаноидов ($\text{La}_N = 42-76$, $\text{La}/\text{Sm}_N = 2.1-3.8$) относительно PAAS, но в целом имеют схожие характеры распределения (рис. 9В). На мультикомпонентных спектрах отмечаются минимумы по Th (14-47) и максимумы по Sr (6-71). На всех спектрах присутствуют отрицательные аномалии по Ta и Nb ($\text{Nb}/\text{La}_{\text{pm}} = 0.1-0.4$, $\text{Nb}/\text{Th}_{\text{pm}} = 0.1-0.2$, $\text{Ta}/\text{Th}_{\text{pm}} = 0.2-0.3$) (рис. 9Г).

Исходные изотопные отношения были пересчитаны на раннекарбонный возраст (340 млн лет), полученный по результатам U-Pb датирования цирконов. Изотопный состав Nd получен для одного образца Жарминской зоны (Zh-1-13). Он характеризуется отношениями $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1421$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512764$ соответственно. Образец имеет положительное значение $\epsilon\text{Nd}(t) = +4.8$ с модельным возрастом $T_{\text{DM2}} = 711$ млн. лет (рис. 6А). Изотопный состав Lu-Hf в цирконах был получен для 9 точек образца Жарминской зоны (рис. 6Б). В образце Zh-1-13 получены положительные значения $\epsilon\text{Hf}(t)$ от +7.2 до +13.5 с модельным возрастом T_{DM2} от 896 до 371 млн. лет.

Таким образом, Жарминская зона Восточного Казахстана наряду с надсубдукционными магматическими формациями включает осадочные толщи с преобладанием граувакковых песчаников, сформированных в условиях преддугового бассейна или желоба. По разным классификациям песчаники петрографически представляют собой литарениты, а геохимически – сланцы. Унимодальное распределение U-Pb возрастов цирконов свидетельствует об их формировании при разрушении внутриокеанических дуг. Их основные геохимические особенности с точки зрения, как основных оксидов, так и микроэлементов очень близки к характеристикам надсубдукционных магматических пород. Данные по изотопам Hf в цирконе и Nd по породе предполагают происхождение их магматических протолитов из ювенильных мантийных источников, характерных в первую очередь для внутриокеанических дуг. Распределения U-Pb возрастов цирконов из граувакковых песчаников имеют схожую форму с таковыми, полученными из аналогичных пород, представленных в соседних регионах западной Джунгарии, но отличаются от спектров детритовых цирконов из песчаников Горного Алтая и Китайского Алтая, где преобладают континентальные дуги. Комплексный анализ всех новых данных и предыдущих результатов позволяет нам сделать вывод, что граувакковые песчаники восточного Казахстана образовались на конвергентной окраине тихоокеанского типа, в пределах одной или нескольких внутриокеанических дуг [Перфилова и др., 2021; Safonova, Perfilova et al., 2021].

Результат 3

Южный Тянь-Шань (ЮТШ) является частью Южно-Ферганской синформы и относится к южному сегменту Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) – крупнейшего фанерозойского орогена, эволюция которого продолжалась более 800 млн лет. Формирование ЮТШ происходило в конце палеозоя в результате коллизии Казахстанского палеоконтинента на севере и Каракум-Таджикского и Таримского кратонов на юге. В строении ЮТШ принято выделять два сегмента, имеющих разное происхождение. К северному сегменту относится Букантау-Кокшаальский пояс/складчатая зона с южной вергентностью, к южному сегменту – Зеравшано-Восточно-Алайский пояс с северной вергентностью. Основную роль в строении ЮТШ принимают осадочные породы: карбонаты, склоновые терригенные и карбонатные турбидиты, пелагические кремни и глинистые отложения. В подчинённом количестве представлены офиолиты, вулканиты внутриплитные и островодужные и метаморфические породы (рис. 10).

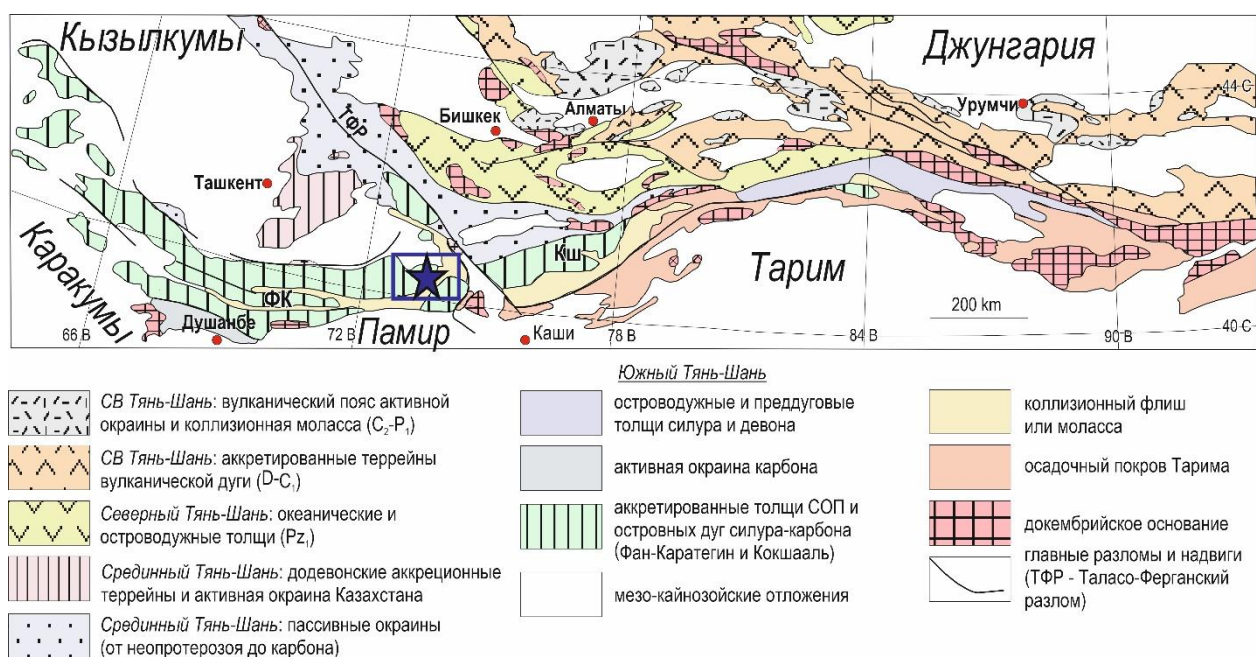


Рис. 10. Тектоническая схема Тянь-Шаня с отмеченным регионом работ по [Biske, Seltmann, 2010].

В состав Алайского АК Букантау-Кокшаальского пояса входят структуры аккреционного пояса Алайского хребта. Образование этих структур, относящихся к герцинской складчатой области ЮТШ, связывают с развитием Туркестанской ветви Палеоазиатского океана. В пределах Алайского АК были диагностированы магматические породы основного-среднего состава (базальты, андезиты), кремни, кремнистые алевролиты, аржиллиты и сланцы, песчаники и гравелиты. Нами были изучены терригенные

породы, отобранные с участков Араван, Пулгон и Кызыл-Кия, которые относятся к пульгонской (S_{1-2}), араванской (D_{1-2}), намаздыкской (D_{1-2}) и актерекской (C_{2at}) свитам. На участке Гульча образцы отобраны из чонкойской (ϵ_1) свиты и нерасчлененной толщи S_{1V} - D_1 . Эти породы представляют собой плохосортированные, мелко-среднезернистые песчаники серого цвета. Массивные выходы песчаников, как правило, находятся в ассоциации с кремнями, кремнистыми аргиллитами и алевролитами, реже с вулканическими породами и известняками. Песчаники состоят преимущественно из обломков вулканических и осадочных пород (30-40%) и полевых шпатов (20-35%), соответствуя полевошпат-кварцевым и кварц-полевошпатовым грауваккам по классификации.

Содержание большинства порообразующих окислов варьирует в широких диапазонах: $SiO_2 = 46.2-71.4$, $TiO_2 = 0.18-1.52$, $Al_2O_3 = 6.59-19.11$, $Fe_2O_3 = 3.87-9.12$, $MgO = 1.65-6.71$ мас. %. На классификационной диаграмме Петтиджона (рис. 11а) точки составов исследуемых пород расположены в поле граувакк, реже - в поле литаренитов. Индекс CIA изменяется в широком интервале от 47.4 до 72.4, что говорит о низкой степени выветривания. Индекс ICV варьирует в диапазоне от 0.9 до 2.6, что соответствует незрелым осадкам. Значения $ICV > 1$ указывают на присутствие обломков плагиоклаза, калиевого полевого шпата, амфиболов, пироксенов и пород. Более зрелые породы, состоящие в основном из глинистых минералов, имеют значение $ICV < 1$. Для образца DZH-4 пульгонской свиты (?) (участок Гульча, S_{1V} - D_1) характерны повышенные содержания $MgO = 15.8$ мас. % и $CaO = 13.3$ мас. %. В образце KGZ-09-18 пульгонской свиты (участок Араван, S_{1-2}) отмечается повышенное содержание $Fe_2O_3 = 16.25$ мас. %. Содержания некоторых петрохимических модулей имеют повышенные значения: железистый (ЖМ) = 0.59-2.33, титановый (ТМ) = 0.03-0.12, фемический (ФМ) = 0.09-0.75.

Песчаники характеризуются фракционированным распределением РЗЭ с обогащением легкими лантаноидами ($La_N = 22-188$, $La/Yb_N = 0.9-12$, $La/Sm_N = 0.9-4.7$) и фракционированным распределением тяжелых РЗЭ ($Gd/Yb_N = 1.0-2.2$). Распределение редких элементов характеризуется минимумом по Ta и Nb ($Nb/La_{pm} = 0.2-0.8$, $Ta/La_{pm} = 0.3-0.8$, $Nb/Th_{pm} = 0.1-1.1$, $Ta/Th_{pm} = 0.1-1.1$). Песчаники Алайского аккреционного пояса обладают содержаниями редких элементов в целом ниже уровня PAAS, но характеризуются схожим характером их распределения. Значения Eu/Eu^* для песчаников выше, чем для PAAS (0.6-0.9 и 0.6 соответственно).

На дискриминационной диаграмме $Fe_2O_3+MgO - Na_2O/K_2O$ (рис. 1б) точки составов попадают в области континентальных дуг и активной континентальной окраины. На графике $Hf - La/Th$ (рис. 11в) точки составов песчаников попадают преимущественно в

области размыва островных дуг кислого состава. Единичные отметки отмечаются в полях толеитовых и андезитовых островных дуг, а также островных дуг кислого/основного состава. Величины $\epsilon_{Nd}(t)$ были рассчитаны для позднекембрийского возраста (500 млн лет) на основе биостратиграфических данных. Для образца IS-15, отобранного из араванской свиты (участок Кызыл-Кия, D₁₋₂), и образца DZH-4 пульгонской свиты (?) с участка Гульча получены отрицательные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ равные -8.5 и -6 (рис. 11г). Положительное значение $\epsilon_{Nd}(t) = +8.1$ получено для образца Kgz-09-18 пульгонской свиты Араванского участка (рис. 11г).

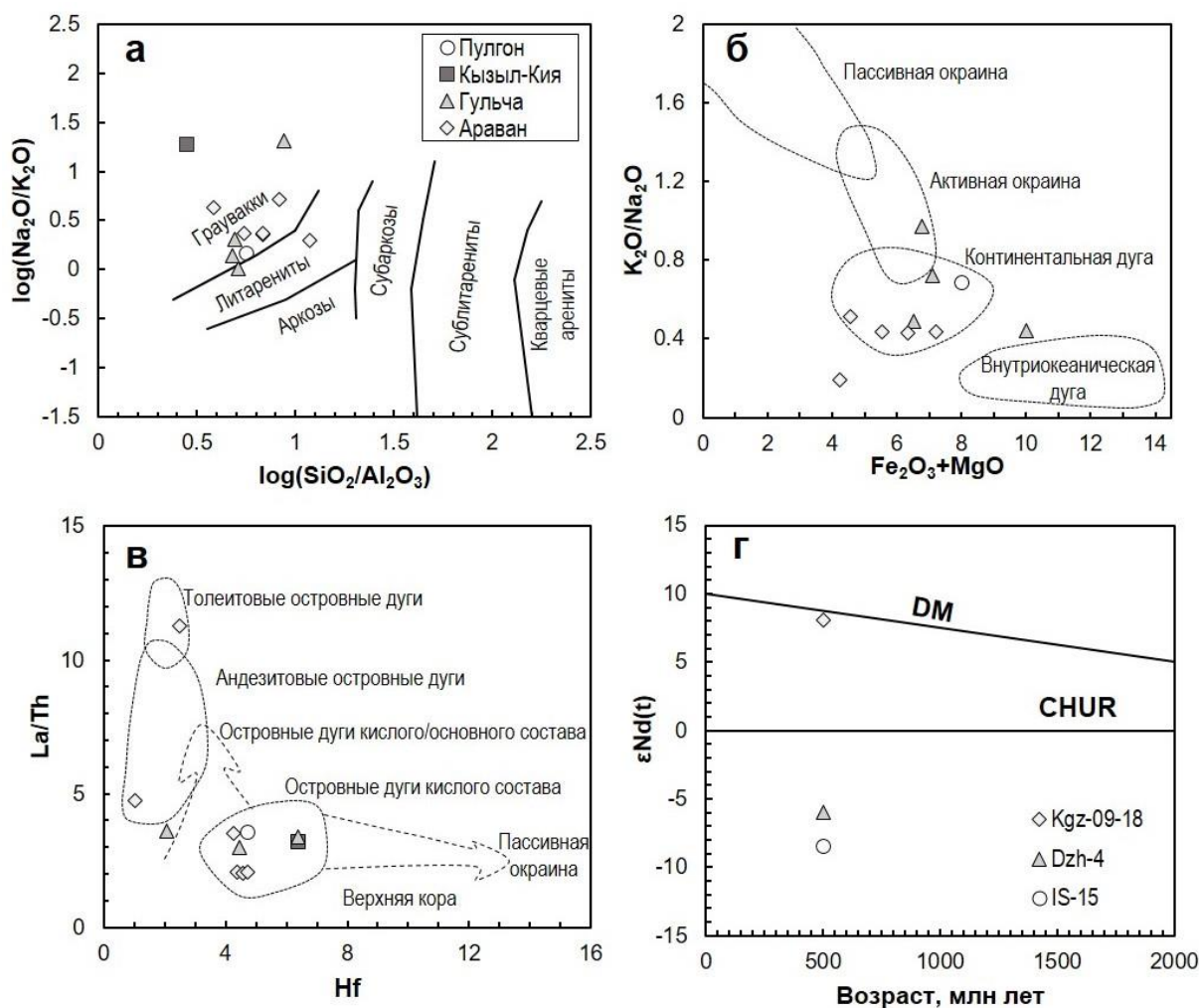


Рис. 11. Классификационная диаграмма Петиджона (А) [Pettijohn et al., 1972], дискриминантные диаграммы (Б, В) [Bhatia, 1983; Floyd, Leveridge, 1987] и график $\epsilon_{Nd}(t)$ -T (Г).

Таким образом, изученные песчаники Алайского АК, ассоциирующие с вулканическими и осадочными породами океанического происхождения, по петрографическому и геохимическому составу относятся к грауваккам и литаренитам. Петрохимические и геохимические характеристики позволяют рассматривать изученные породы как незрелые слабыветрелые осадки и указывают на присутствие в области сноса

магматических пород преимущественно среднего-кислого состава. Различные величины $\epsilon\text{Nd}(t)$ в образцах с участков Араван (положительное) и Гульча-Кызыл-Кия (отрицательные) предполагает различный состав пород в области сноса и их различные источники – с участием как ювенильного, так и древнего рециклированного материала. Совокупность полученных данных позволяет предположить, что изученные граувакковые песчаники, вероятно образовались в результате разрушения как минимум двух различных магматических дуг различного состава и геодинамических обстановок [Перфилова и др., 2022б].

Заключение

Во всех разрезах песчаники ассоциируют с образованиями стратиграфии океанической плиты: базальтами, пелагическими и гемипелагическими кремнистыми осадками. По петрографическим и геохимическим характеристикам песчаники Итмурундинского АК соответствуют грауваккам, ПШ-Кв грауваккам, литаренитам и ПШ-литаренитам (рис. 4А, Б; 5А). Состав песчаников Жарминского АК отвечает собственно грауваккам, ПШ- и ПШ-Кв-грауваккам, литаренитам и ПШ-литаренитам (рис. 4А, Б; 9А). Состав песчаников Алайского АК также соответствует грауваккам (рис. 11А).

На диаграммах $\text{Co/Th} - \text{La/Sc}$ (рис. 12А) и $\text{Zr/Sc} - \text{Th/Sc}$ (рис. 12Б) [McLennan et al., 1993], отражающих состав пород в питающей провинции, точки с Центрального сегмента Итмурундинской зоны расположены в поле базальтов и андезитов, образцы Жарминской зоны распределены преимущественно в области андезитов с небольшим трендом в сторону кислых пород. На диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (рис. 12В) [Bhatia, 1983], определяющей основные геодинамические обстановки пород области сноса, точки составов песчаников с Итмурундинской и Жарминской зон распределяются в полях как внутриокеанических, так и континентальных дуг. На треугольнике La-Th-Sc (рис. 12Г) [Bhatia, Crook, 1986] все точки изученных АК расположены в полях внутриокеанических и континентальных дуг.

Унимодальный характер распределения U-Pb возрастов (рис. 3А, Б) и положительные значения $\epsilon\text{Nd}(t)$ и $\epsilon\text{Hf}(t)$ (рис. 6А, Б) и геохимические данные, полученные для образцов Центрального сегмента Итмурундинской зоны и северной части Жарминской зоны (рис. 12), предполагают образование песчаников в результате разрушения внутриокеанической островной дуги, сложенной магматическими породами основного до среднего состава с ювенильными характеристиками. Отложение песчаников происходило

в обстановке преддугового бассейна и/или глубоководного желоба. Полимодальное распределение (рис. 3В, Г) с отрицательным значением $\epsilon\text{Nd}(t)$ и широкий разброс значений $\epsilon\text{Hf}(t)$ (рис. 6А, Б) в образцах с Восточного сегмента Итмурундинской зоны подразумевает образование песчаников в задуговом бассейне за счет разрушения магматических пород среднего и кислого состава внутриокеанической островной дуги (рис. 12) с поступлением более древнего рециклированного материала в бассейн седиментации. Образец с Восточного сегмента с меньшим количеством древних возрастов ($n = 32$) мог накапливаться в пределах задугового бассейна, но на небольшом удалении от дуги, а накопление песчаника с большим количеством древних пиков ($n = 63$) вероятно происходило в том же задуговом бассейне, но ближе к континентальной окраине.

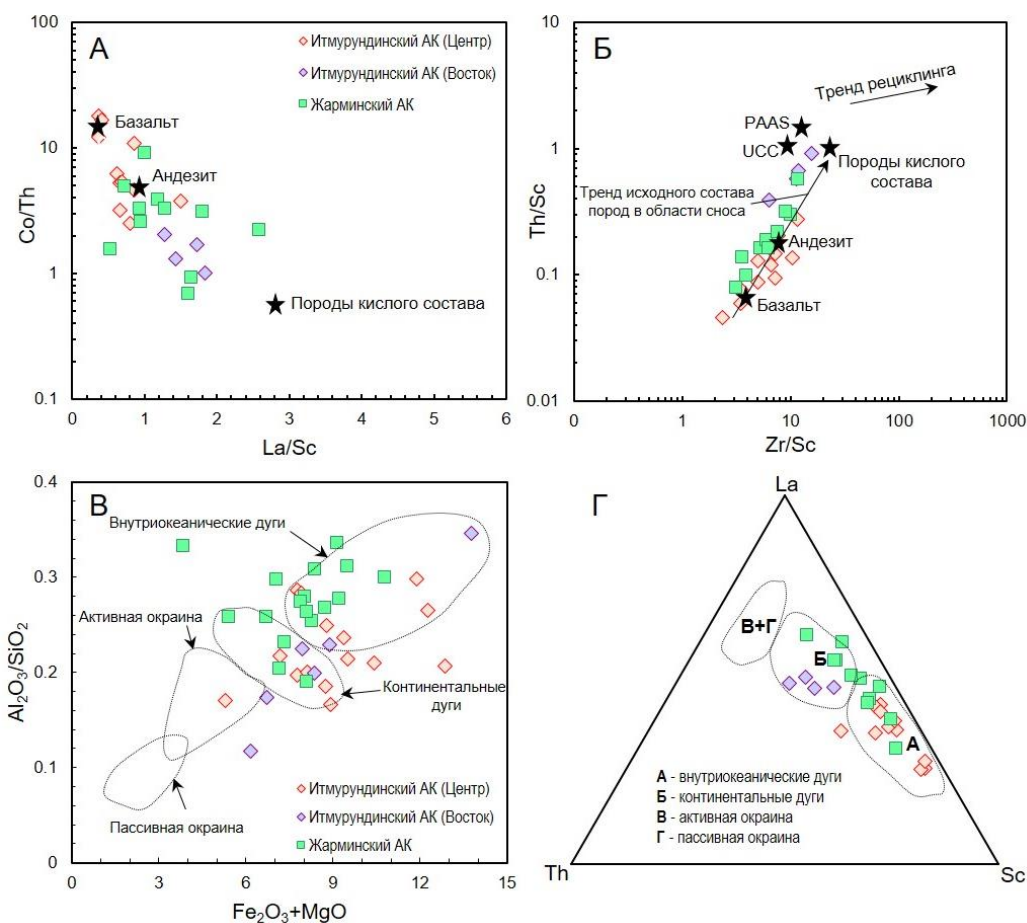


Рис. 12. Дискриминационные диаграммы La/Sc – Co/Th (А) и Zr/Sc – Th/Sc (Б) [McLennan et al., 1993], используемые для определения состава исходных магматических пород в области сноса и различных тектонических обстановок (В, Г) [Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986].

Песчаники Алайского АК имеют различные величины $\epsilon\text{Nd}(t)$ (рис. 6А), что предполагает участие и ювенильного и рециклированного материала в генезисе их магматических протолитов и их образование при разрушении различных по составу и происхождению магматических дуг (рис. 11Б, В).

На основании комплексного анализа геологических, геохронологических и изотопно-геохимических данных было обосновано образование песчаников Итмурундинской зоны в результате разрушения внутриокеанических и континентальных дуг кембро-ордовикского возраста. Песчаники Жарминской зоны сформировались за счет эрозии внутриокеанической дуги раннекарбонного возраста. Активное осадконакопление песчаников началось в раннем силуре (центральный Казахстан) и позднем карбоне (Жарминская зона).

Все задачи по проекту выполнены в полном объеме. Опубликовано 2 статьи в рецензируемых журналах (WoS, Scopus, РИНЦ) и 3 тезисов в материалах конференций (РИНЦ). На всех конференциях представлены устные доклады. Завершается подготовка диссертационной работы на тему «Реконструкция магматических дуг по данным изучения граувакковых песчаников из аккреционных комплексов центрального и восточного Казахстана» на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.01 «Общая и региональная геология». Защита диссертационной работы планируется в Санкт-Петербургском государственном университете.

Список литературы

- Геологическая карта СССР. 1:200 000. Серия Прибалхашская. Лист L-43-XI / Сост. В.Я. Кошкин, В.В. Галицкий. Южно-Казахстанское геологическое управление Министерства геологии и охраны недр СССР, 1960.
- Геологическая карта. 1:200 000. Серия Зайсанская. Лист М-44-XXXIV / Отв. исп. Е.О. Атамановский ТОО «ГРК ТОПАЗ», 2014.
- Дегтярев К.Е. Тектоническая эволюция раннепалеозойской активной окраины в Казахстане. – М.: Наука, 1999, 123 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 513)
- Новикова М.З., Герасимова Н.А., Дубинина С.В. Конодонты из вулканогенно-кремнистого комплекса Северного Прибалхашья // Доклады АН СССР, 1983, т. 271, с. 1449-1451.
- Паталаха Е.И., Белый В.А. Офиолиты Итмурунды-Казыкской зоны // Офиолиты. Алма-Ата, 1981, с. 7-102.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Савинский И.А., 2020. Источники и тектонические обстановки формирования терригенных пород Итмурундинского аккреционного комплекса (северное Прибалхашье, центральный Казахстан). В кн.: Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXXI молодежной научной школы-конференции, посвящённой памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца (Санкт-Петербург, 5–9 октября 2020 г). — Санкт-Петербург: Своё издательство, 2020. — 214-217 с.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Котлер П.Д. Цирконометрия, химический и изотопный состав песчаников Чарской и Жарминской зон восточного Казахстана: корреляция, источники и тектонические обстановки // Материалы XXXII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О.

- Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова, г. Петрозаводск, 12–15 октября 2021. Петрозаводск: КарНЦ РАН, с. 121-124.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Котлер П.Д., Савинский И.А., Гурова А.В., 2022а. Тектонические обстановки образования вулканических и осадочных пород Итмурундинской зоны центрального Казахстана. Геодинамика и тектонофизика 13 (1), 0572. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0572.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Бискэ Г.С., Конопелько Д.Л., Ковач В.П., Орозбаев Р.П. Геологическое положение и вещественный состав терригенных пород Алайского хребта (Киргизия, Южный Тянь-Шань). Материалы LIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2022б, с. 78-82.
- Сафонова И.Ю., Перфилова А.А., Обут О.Т., Савинский И.А., Чёрный Р.И., Петренко Н.А., Гурова А.В., Котлер П.Д., Хромых С.В., Кривоногов С.К., Маруяма Ш. Итмурундинский аккреционный комплекс (северное Прибалхашье): геологическое строение, стратиграфия и тектоническое происхождение // Тихоокеанская геология, 2019, т. 38, № 3, с. 102-117.
- Степанец В.Г. Офиолиты Казахстана. Геология и геодинамика // Академическое издательство Ламберт, 2016, 251 с.
- Хромых С.В. Позднепалеозойский базитовый магматизм Алтайской аккреционно-коллизонной системы (восточный Казахстан) / Дисс. на соискание уч. степени доктора геол.-мин. наук., Новосибирск, 2020.
- Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые, 1967, № 5, с. 86-102.
- Alexeiev, D.V., Ryazantsev, A.V., Kröner, A., Tretyakov, A.A., Xia, X., Liu, D.Y., 2011. Geochemical data and zircon ages for rocks in a high-pressure belt of Chu-Yili Mountains, southern Kazakhstan: Implications for the earliest stages of accretion in Kazakhstan and the Tianshan. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 805-820.
- Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology* 91, 611-627.
- Bhatia, M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace elements characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92, 181-193.
- Biske, Yu.S., Seltmann, R., 2010. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans. *Gondwana Research* 17, 602– 613.
- Buslov, M.M., Safonova, I.Yu., Watanabe, T., Obut, O.T., Fujiwara, Y., Iwata, K., Semakov, N. N., Sugai, Y., Smirnova, L.V., Kazansky, A.Yu., Itaya, T., 2001. Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent. *Geoscience Journal* 5, 203-224.
- Cox, R., Lowe, D. R. A., 1995. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Journal of Sedimentary Research* 1, 1-12.
- Degtyarev, K.E., Luchitskaya, M.V., Tretyakov, A.A., Pilitsyna, A.V., Yakubchuk, A.S., 2021. Early Paleozoic suprasubduction complexes of the North Balkhash ophiolite zone (Central Kazakhstan): Geochronology, geochemistry and implications for tectonic evolution of the Junggar-Balkhash Ocean. *Lithos* 380- 381, 105818.

- Degtyarev, K.E., Tolmacheva, T.Yu., Tretyakov, A.A., 2020. Siliceous–volcanic associations of the Northern Balkhash ophiolite Zone (Central Kazakhstan): Biostratigraphy, sedimentation and tectonic evolution in the Middle-Late Ordovician. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.* 551, 109748.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic environments of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society of London* 144, 531-542.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill, Austin. 184 p.
- Isozaki, Y., Maruyama, S., Fukuoka, F., 1990. Accreted oceanic materials in Japan, *Tectonophysics* 181, 179-205.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: M.J. Johnsson, A. Basu (eds.) *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Special Papers, Geological Society of America 284, 21-40.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1972. *Sand and sandstone*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Safonova, I., Savinskiy, I., Perfilova, A., Gurova, A., Maruyama, S., Tsujimori, T., 2020. The Itmurundy Pacific-type orogenic belt in northern Balkhash, central Kazakhstan: Revisited plus first U-Pb age, geochemical and Nd isotope data from igneous rocks. *Gondwana Res.* 79, 49-69.
- Safonova, I.Yu., Perfilova, A.A., Aoki, S., Komiya, T., Wang, B., Sun, M., 2021. Traces of intra-oceanic arcs recorded in sandstones of eastern Kazakhstan: implications from U–Pb detrital zircon ages, geochemistry, and Nd–Hf isotopes. *International Journal of Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02059-z>.
- Sun, S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. London, Spec. Pub. 42, 313-345.
- Taylor, S.T., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312.
- Windley, B.F., Alexeiev, D., Xiao, W., Kröner, A., Badarch, G., 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Geol. Soc. London*. 164, 31-47.
- Zhylkaidarov, A.M., 1998. Conodonts form Ordovician of Central Kazakhstan. *Acta Palaeontol. Pol.* 43, 53-68.