

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.4+552.51(234.853)

doi: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114

СРЕДНЕ-ВЕРХНЕДЕВОНСКИЕ ПЕСЧАНИКИ ЗАПАДНО-МАГНИТОГОРСКОЙ ЗОНЫ ЮЖНОГО УРАЛА

А.М. Фазлиахметов

Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, 450077, Россия

Аннотация

До настоящего времени состав обломочных отложений Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала был охарактеризован на основе лишь небольшого количества образцов. Учитывая большую мощность разрезов (до первых километров), нами предпринята попытка изучения граувакк по увеличенному количеству проб – из каждой свиты было отобрано и изучено несколько десятков образцов.

В статье приведены результаты исследований средне- и верхнедевонских отложений по 169 образцам, отобранным из одного непрерывного разреза. Большое количество проб позволило расчленить верхнедевонский интервал с большей детальностью; выделить отдельные петротипы граувакк ирендыкской, биягодинской и зилаирской свит. Кроме того, на представительном фактическом материале получены результаты, которые уточняют данные более ранних работ: выделены три генетические группы граувакк – тефрогенные (ирендыкская, улутауская, зилаирская свиты), вулканотерригенные (нижняя пачка нижней подсвиты биягодинской свиты) и терригенные (верхняя пачка нижней подсвиты биягодинской свиты); седиментация протекала в акватории энсиматической островной дуги без явных признаков химического выветривания; установлены отличительные особенности кластолитов разных стратиграфических интервалов.

Полученные результаты подтверждают целесообразность отбора большого количества проб в отдельно взятых разрезах.

Ключевые слова: тефрогенный, вулканотерригенный, тефротурбидит, граувакки, ирендыкская свита, улутауская свита, биягодинская свита, зилаирская свита, островная дуга, Upper Kellwasser

Введение

В Западно-Магнитогорской зоне Южного Урала (ЗМЗ) наиболее распространены девонские вулканогенные и осадочные образования, сформировавшиеся в акватории Магнитогорской островной дуги. Во многих разрезах преобладают обломочные отложения, преимущественно песчаники, сложенные зернами вулканитов разного состава, кристаллокластами плагиоклаза, кварца, пироксена, реже обломками метаморфических пород. Накопление их происходило посредством турбидных и обломочных потоков (турбидиты и дебриты). Стратиграфия этих отложений детально разработана и благодаря многочисленным находкам отпечатков конодонтов в кремнях и яшмах, переслаивающихся с песчаниками, увязана с Международной стратиграфической шкалой [1, 2].

Характерными чертами девона ЗМЗ являются изменчивость состава отложений по разрезу и простиранию и их большая мощность – до 1500–2000 м для отдельных свит [1–3]. Эти обстоятельства обуславливают необходимость в особом подходе к проведению исследований. Прежде всего это относится к частоте отбора проб. До настоящего времени исследователи ограничивались лишь первыми десятками, а иногда и единицами образцов для характеристики отдельной свиты или толщи всего протяжения ЗМЗ. По всей видимости, этого недостаточно. Состав пород должен характеризоваться по гораздо большему количеству проб – нескольким десяткам для отдельной свиты в одном разрезе.

Результаты верификации данного тезиса, основанного на петрографическом и геохимическом изучении представительного количества образцов, отобранных из непрерывного разреза среднего и верхнего девона, изложены в настоящей статье.

Немаловажной задачей исследований является также установление отличительных особенностей граувакк разных стратиграфических интервалов.

1. Фактический материал и методика работ

В основе работы лежат результаты изучения 169 образцов, отобранных из коренных обнажений по профилю д. Тирман – д. Идяш-Кускарово – д. Ишкулово (Абзелиловский район, Республика Башкортостан) (рис. 1). Из них 61 образец относится к отложениям ирендыкской свиты, 20 – к улутауской, 43 – к биягодинской, 45 – к зилаирской.

Изученный разрез в достаточной мере охарактеризован находками отпечатков конодонтов, хорошо обнажен по долине р. Большой Кизил и автотрассе д. Тирман – с. Аскарово, является стратотипическим для биягодинской свиты.

Во всех образцах было установлено содержание породообразующих элементов посредством силикатного анализа (аналитик С.А. Ягудина, ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа), а концентрации хрома, кобальта и никеля – при помощи атомно-абсорбционного анализа (аналитик Н.Г. Христофорова, ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа).

Содержание зерен разного состава установлено при их поштучном подсчете под микроскопом в количестве не менее 300 шт. на шлиф.

2. Краткая характеристика отложений

Разрез по профилю д. Тирман – д. Идяш-Кускарово – д. Ишкулово начинается с нижнедевонских отложений (рис. 2). Они представлены вулканогенными и осадочными породами рыскужинской толщи и баймак-бурибаевской свиты, охарактеризованными в работах [3–6], но здесь они не рассматриваются в силу сложности в выстраивании фрагментов разреза в непрерывную последовательность.

Средне-верхнедевонские отложения, включающие в себя ирендыкскую, ярлыкаповскую, улутаускую, мукасовскую, биягодинскую и зилаирскую свиты, залегают согласно, моноклинально, с падением на восток под углом 30–50°. На основании многочисленных находок конодонтов они увязаны с Международной стратиграфической шкалой [1] (см. рис. 2).

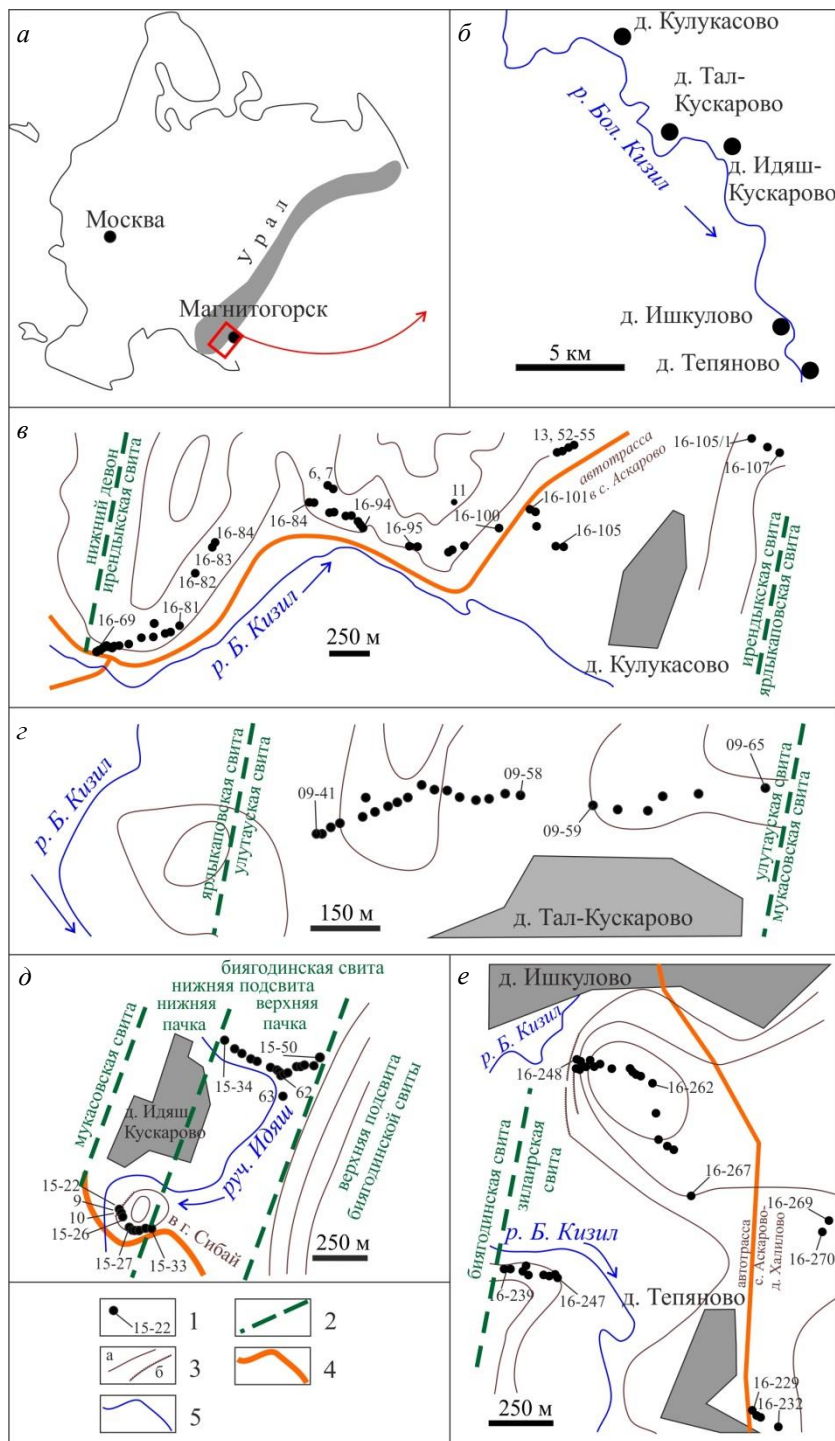


Рис. 1. Местоположение района исследований (а, б) и пунктов отбора проб (в-е). Условные обозначения: 1 – пункты отбора проб и их номера; 2 – приблизительное положение стратиграфических границ; 3 – горизонталы (а) и обрывы (б); 4 – автодороги; 5 – реки

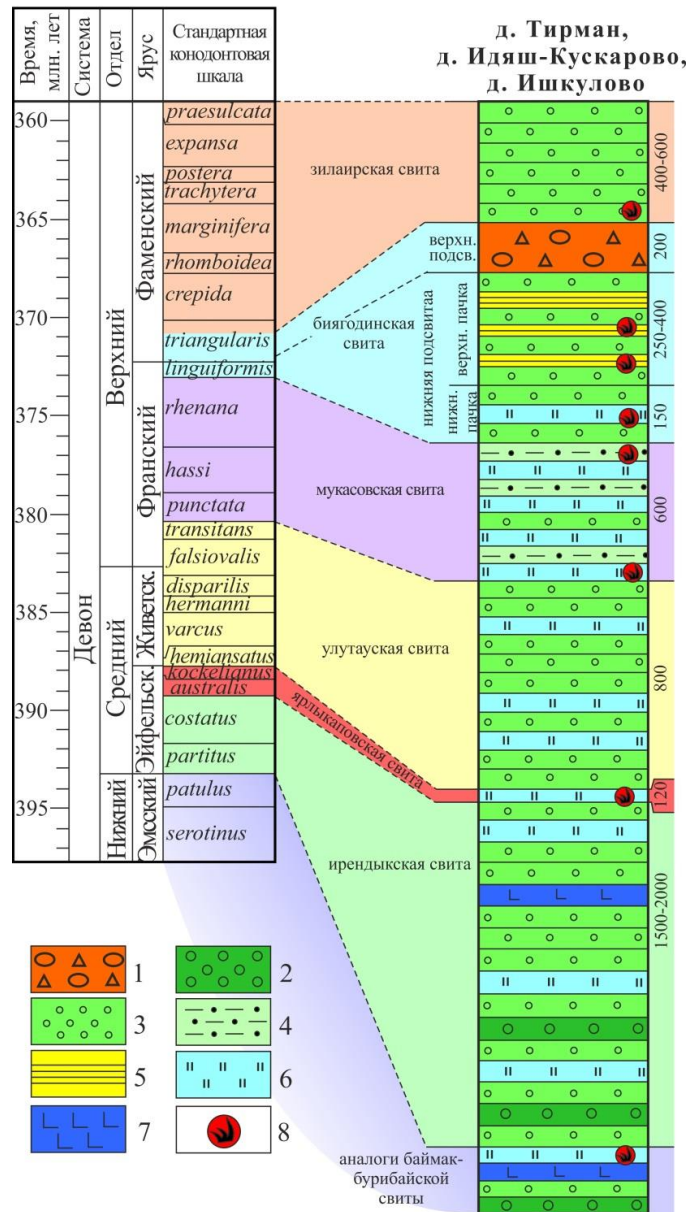


Рис. 2. Литологическая колонка средне-верхнедевонских отложений по профилю д. Тирман – д. Идяш-Кускарово – д. Ишкулово в сопоставлении с международной стратиграфической шкалой по [7]. Условные обозначения: 1 – псефитолиты с обломками грубее 10 мм; 2 – псефитолиты с размером обломков 2–10 мм; 3 – песчаники; 4 – алевролиты; 5 – аргиллиты и глинистые сланцы; 6 – кремни и яшмы; 7 – базальты и андезибазальты; 8 – находки коноднтов по [1]

Разрез ирендыкской свиты (нижний эйфель) представляет собой последовательность преимущественно вулканокластических граувакк и кремней. Обломочные разности иных гранулометрических классов, включая псефитолиты, и вулканиды среднего и основного состава имеют резко подчиненное значение. Мощность 1500–2000 м.



Рис. 3. Псевдосферовая (десквамационная) отдельность в песчаниках улутауской свиты (левобережье левого притока р. Большой Кизил, спускающегося с севера к д. Тал-Кускарово, координаты N 53°157.28"; E 58°27'17.72")

Ярлыкаповская свита сложена сургучно-красными слоистыми яшмами. Мощность 100–120 м.

Улутауская свита, аналогично ирендыкской, представлена циклически чередующимися вулканокластическими граувакками и кремнями. Отличием ее служит присутствие нескольких прослоев глыбовых и щебневых микститов. Мощность 800 м.

Интересно отметить, что местные жители используют граувакки улутауской свиты для строительства. При добыче камня ими вскрыты структуры псевдосферовой (десквамационной) отдельности. Диаметр шаров иногда превышает 3 м (рис. 3)!

Мукасовская свита повсеместно в ЗМЗ представлена черными и темно-серыми кремнями мощностью до 100 м, но у д. Тал-Кускарово ее разрез является аномальным, поскольку сложен не только кремнями, но и аргиллитами, алевролитами и песчаниками, и имеет мощность в первые сотни метров. Точно ее измерить нельзя из-за плохой обнаженности и наличия складчатых структур.

К сожалению, во всех исследованных обнажениях кластоциты мукасовской свиты сильно выветрелые, трещиноватые, насыщены окислами и гидроокислами железа, что резко ограничивает возможность их изучения. Далее они не рассматриваются.

Разрез биягодинской свиты у д. Идяш-Кускарово является стратотипическим. Согласно [1], свита имеет двучленное строение. Ее нижняя подсвита мощностью 450 м соответствует пограничному франско-фаменскому интервалу. Она сложена преимущественно граувакками с подчиненными прослоями кремней и глинистых сланцев. Верхняя подсвита биягодинской свиты относится к нижнему фамену и представлена олистостромом, имеющим мощность около 200 м. В его составе принимают участие глыбы вулканитов преимущественно среднего и основного состава, вулканогенно-обломочных пород, известняков и др.

Зилаирская свита, как улутауская и ирендыкская свиты, сложена ритмично-переслаивающимися вулканокластическими песчаниками, но практически не имеет прослоев кремней и микститов. Мощность 400–600 м.

По способу транспортировки обломочного материала все исследованные песчаники являются турбидитами и дебритами, то есть отложениями турбидных и обломочных (ламинарных) гравитационных потоков. Накопление их протекало в глубоководных условиях, в подножии Магнитогорской островной дуги [8–10].

3. Петрографическая характеристика песчаников

Песчаники ирендыкской свиты состоят из плагиоклаза, клинопироксена (авгит) и обломков пород. По классификации В.Д. Шутова [11] выделяются две их группы – граувакки и полевошпатовые граувакки. Соответствующие им точки на треугольной диаграмме с вершинами кварц, обломки пород и полевые шпаты сформировали два изолированных кластера (рис. 4). В граувакках зерна пород составляют 56–75% от общего количества зерен, плагиоклазы – 9–19%; в полевошпатовых граувакках – 49–57% и 31–40% соответственно. Содержание пироксенов колеблется в интервале 2–35%, преобладают они преимущественно в граувакках.

Плагиоклазы имеют изометричную или слабоудлиненную форму. Контуры их неправильные, треугольные, реже напоминают таблички с обломанной одной или двумя сторонами. Часто углы закруглены. Обычны полисинтетические двойники, меньшее значение имеют гломеровые сростки. Степень вторичных изменений меняется от образца к образцу. Типичны серицитизация, хлоритизация, кальцитизация и пумпеллиитизация.

Клинопироксены представлены авгитом. Кристаллокласты удлиненные и изометричные, редко с сохранившимися кристаллографическими формами. Обычны неправильные угловатые осколки. Часты полисинтетические двойники. Вторичные изменения проявлены хлоритизацией, пумпеллиитизацией, редко окварцеванием.

Среди *обломков пород* преобладают вулканогенные разности. Метаморфиты имеют резко подчиненное значение.

Зерна вулканитов не отличаются разнообразием, преобладают пироксеновые и плагиоклазовые порфириды или только их базис с интерсертальной, в меньшей мере с пилотакситовой и гиалопилитовой реликтовыми структурами. Встречаются единичные зерна с фельзитовой структурой и лейкоксенизированные пухлячатые. Форма обломков разнообразная неправильная. Контуры многих зерен округлые, кляксоподобные с заливами и выступами, рогульчатые. Примечательно, что в некоторых зернах вкрапленники выступают за контуры основной массы (торчат), что служит признаком туфовых частиц [12]. Типичны хлоритизация и эпидотизация.

Зерна метаморфитов представлены хлоритовыми, пренитовыми и эпидотовыми разностями. Зерна поликристаллического кварца с гранобластовой структурой (кварциты?) единичны.

Цемент контурный, участками поровый хлоритовый, в некоторых образцах частично кварцевый или пренитовый.

Песчаники улутауской свиты, по классификации В.Д. Шутова, являются полевошпатовыми граувакками и собственно граувакками (см. рис. 4).

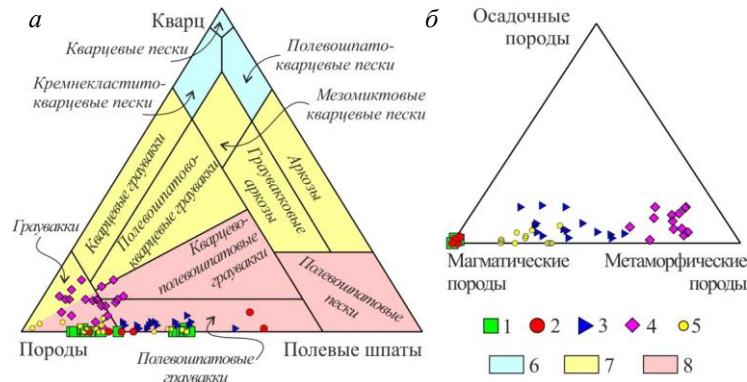


Рис. 4. Основная (а) и вспомогательная (б) диаграммы В.Д. Шутова [11] для средне-верхнедевонских песчаников профиля д. Тирман – д. Ишкулово. Условные обозначения: 1 – ирендыкская свита; 2 – улутауская свита; 3, 4 – нижняя (3) и верхняя (4) пачки нижней подсвиты биягодинской свиты; 5 – зилаирская свита; 6–8 – первый (6), второй (7) и третий (8) тектоно-полимиктовые уровни диаграммы В.Д. Шутова

Кварц имеет подчиненное значение и встречается в количестве до 3% в нижней и в верхней частях свиты. Его форма округлая, вероятно, унаследованная от порфировых выделений кварца в кислых расплавах, а также угловатая, неправильная, иногда саблевидная, треугольная. В неизмененных разностях кварц имеет равномерное погасание, в тектонизированных – трещиноватый, с деформационным пластинкованием.

Плагиоклазы (32–61%) монокристаллические и полисинтетически сдвойникованные, крайне редко зональные. Большинство зерен имеет форму осколков неправильной формы или табличек, отколотых с одной стороны. Целые кристаллы редки. Некоторые плагиоклазы с одной или двух сторон окружены каймой из базиса эффузива. Все зерна в разной степени серицитизированы, хлоритизированы или пумпеллиитизированы.

Обломки пород (33–55%) в подавляющем своем большинстве являются плагиоклазовыми порфиритами с реликтовой интерсертальной, витрофировой, гиаиновой и редко с гиалофитовой структурой основной массы. Встречаются единичные пузырьчатые зерна, пустоты в которых заполнены хлоритом. Форма зерен неправильная, угловатая, иногда рогульчатая, прихотливая с выступами и заливами. Типичны хлоритизация, пренитизация и эпидотизация. Помимо вулканитов встречаются единичные зерна глинистых алевролитов, кремней, богатых плагиоклазом субвулканических пород, хлоритолитов, кварцитов.

Зерна прилегают друг к другу плотно, их границы часто конформные и стилолитоподобные. Цемент контактовый и поровый хлоритовый, развит участками в крайне малом количестве.

Строение нижней подсвиты биягодинской свиты детализировано в ходе исследований: по петрографическому и геохимическому составу песчаников разрез явно делится на две пачки – нижнюю и верхнюю. Их мощности 150 и 300 м соответственно.

Фигуративные точки состава **песчаников нижней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты** на диаграмме В.Д. Шутова занимают поле полевошпатовых граувакк и в меньшей степени собственно граувакк (см. рис. 4). По соотношению

обломков пород они относятся преимущественно к вулканокластическим разновидностям. Зерна представлены кварцем, плагиоклазами и обломками пород.

Кварц (1–4%) в большинстве своем не окатан, имеет изометричную и слабоудлиненную форму. Некоторые зерна имеют округленные контуры с одной или двух сторон. В мелкозернистых разновидностях присутствуют квадратные, саблевидные, треугольные, удлиненно-треугольные и шестоватые осколки. В редких зернах можно видеть заливы и включения базиса эффузивов. Погасание в большинстве случаев равномерное, редко – волнистое.

Полевые шпаты (19–53%) представлены монокристаллами и полисинтетическими двойниками плагиоклаза. Форма их изометричная и слабоудлиненная, напоминающая осколки, в том числе треугольной и саблевидной формы, редко с незначительно округленными углами. Идиоморфные кристаллы редки, часто можно видеть таблички, отколотые с одной стороны. Изредка встречаются зерна, с одной или двух сторон имеющие рубашку из фельзитовой или микролитовой массы. Характерна хлоритизация и серицитизация.

Обломки пород (46–77%) представлены магматическими, метаморфическими и осадочными разновидностями.

Зерна магматических пород (38–68%) включают преимущественно фрагменты эффузивов кислого и средне-основного состава. Они имеют фельзитовую, микрофельзитовую, микролитовую, сферолитовую, интерсертальную, пилотакситовую и гиалиновую структуры. Кроме вулканитов встречаются единичные зерна, по-видимому, гипабиссальных кислых пород, сложенные сравнительно крупными кристаллами плагиоклаза и кварца (микрограниты).

Контуры зерен эффузивов угловатые, иногда углы незначительно закруглены, ребра слабоизвилистые.

Осадочные породы (2–17%) представлены аргиллитами и кремнями, в том числе радиоляритами, реже встречаются алевролитистые аргиллиты (иногда углистые), алевролиты и тонкозернистые плагиоклазовые песчаники с обильным глинистым матриком. Форма изометричная, слабоудлиненная и удлиненная. Контуры гладкие округлые, без выступов и впадин. Некоторые зерна линзовидные, изогнутые, кляксоподобные, с апофизами и вдавленными в них соседними зернами, что указывает на их неконсолидированное состояние на стадии седиментации.

В ряде образцов встречается кальцит монокристаллический и поликристаллический микрозернистый. Часть этих зерен, по всей видимости, является продуктом разрушения известняков в источнике сноса, а другая часть имеет вторичное происхождение, например, в результате кальцитизации плагиоклазов.

К метаморфическим разновидностям (23–58%) отнесены хлоритовые, хлорит-серицитовые, серицитовые, кварц-серицитовые, кварц-эпидотовые, кварц-хлоритовые сланцы и кварциты. Редко встречаются зерна пумпеллитизированных пород. Приблизительно половину зерен метаморфических пород составляют фрагменты, напоминающие по облику измененные глинисто-тонкообломочные и магматические породы среднего или основного состава. К метаморфитам они отнесены в связи с тем, что их первичная структура и состав были изменены, по всей видимости, ещё в источнике сноса, то есть до процессов мобилизации. На это указывает совместное нахождение зерен метаморфизованных и неметаморфизованных пород.

Форма зерен метаморфитов округленная и остроугольная, у хлоритовых разновидностей часто причудливая, напоминающая рогульки гиалокластитов или пирокластики.

Зерна распределены в породе равномерно, прилегают друг к другу плотно. Сортировка средняя. Цемент в большинстве образцов пленочный, участками поровый, преимущественно хлоритовый и глинисто-хлоритовый, в некоторых случаях – поликристаллический кварцевый и кальцитовый.

Песчаники верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты по соотношению кварца, полевых шпатов и зерен пород относятся в большинстве своем к грауваккам, единичные образцы – к полевошпатовым и кварцево-полевошпатовым грауваккам (см. рис. 4).

Кварц (1–6%) разнообразен по своим идиоморфным свойствам. Встречаются зерна с равномерным погасанием; линейной и неправильной блочностью; фронтальным и облачным волнистым угасанием; грануляционной поликристаллическостью; поликристаллическостью с изогнутыми лапчатыми контурами, деформационным пластинкованием и поясами деформации.

Форма кварца разнообразна – изометричная или слабоудлиненная, угловатая и округленная. Редко встречаются остроугольные зерна, в том числе прямоугольные, треугольные и шестиугольные.

Полевые шпаты (4–20%) представлены преимущественно полисинтетическими двойниками, реже монокристаллами плагиоклаза. Форма слабоудлиненная, реже изометричная. Часто кристаллы отколоты с одной стороны. Плагиоклазы в разной степени серицитизированы, хлоритизированы и кальцитизированы.

Обломки пород (69–87%) разнообразны по своему составу и относятся к магматическим, метаморфическим и осадочным разновидностям.

Магматические породы (11–34%) представлены преимущественно кислыми эффузивами с микрофельзитовой, фельзитовой и микрогранитной структурами основной массы. Значительно реже встречаются зерна с интерсертальной и гиалопилитовой структурами, характерными для вулканитов среднего и основного состава. Редки обломки гранитов и микропегматитов.

Среди метаморфических пород (58–79%) преобладают кварциты, серицитовые, хлоритовые, серицит-хлоритовые, мусковитовые сланцы и эпидот-кварцевые агрегаты. Присутствуют единичные зерна серпентинитов.

Форма зерен кварцитов изометричная слабоокатанная, у хлоритолитов в основном округленная, иногда остроугольная, причудливая, рогульчатая. Зерна прочих метаморфитов удлиненные, угловатые.

Осадочные породы (1–17%) представлены обломками кремнистых и кремнисто-глинистых пород, близких по своим особенностям к таковым из подстилающих отложений.

Зерна распределены в породе равномерно. Характерен глинисто-тонкозернистый матрикс. Сортировка плохая.

В ходе исследований установлено, что макроскопически и по петрографическому составу песчаники нижней и верхней частей **зилаирской свиты** у д. Ишкулово отличаются, что позволяет выделить соответственно нижнюю и верхнюю пачки.

Песчаники нижней части зилаирской свиты относятся к грауваккам по классификации В.Д. Шутова. Слагают их кристаллы плагиоклаза, пироксена, роговой обманки и зерна пород. Макроскопически граувакки напоминают базальты, цвет их темно-зеленый.

Кварц (0–2%) встречается редко. Он угловатый, имеет равномерное погасание.

Кристаллы *плагиоклазов* (2–31%), в отличие от плагиоклазов из песчаников ирендыкской и улугауской свит, часто имеют слабоизвилистые ребра (не прямолинейные), с угловатыми или слегка закругленными выступами и впадинами, что обусловлено конформными или инкорпорационными контактами с соседними зернами. Обычны полисинтетические двойники и монокристаллы. В большинстве своем плагиоклазы удлинены, редко изометричны. Иногда имеют кайму фельзитовой и чаще интерсертальной структуры. В большинстве своем несущественно пелитизированы.

Форма кристаллов пироксена (авгит) и роговой обманки (суммарно 10–27%) угловатая, напоминает осколки. Редко встречаются идиоморфные и слабоокатанные кристаллы. Вторичные изменения не проявлены.

Среди *обломков пород* (53–83%) существенно преобладают вулканические разности с реликтовой витрофировой и гиалопилитовой структурами основной массы, иногда с вкрапленниками пироксенов и плагиоклазов. Практически все зерна пород лейкоксенизированы. Сравнительно часто встречаются зерна богатых плагиоклазом субвулканических пород. В единичных случаях можно встретить зерна с фельзитовой и микролитовой структурами, характерными для вулканитов кислого состава.

Метаморфические породы представлены пумпеллиитовыми, серицит-хлоритовыми, эпидотовыми разностями, редко кварцитами и серпентинитами.

Сортировка средняя. Зерна прилегают друг к другу плотно. Цемент контактовый и поровый хлоритовый, встречается в незначительном количестве. Чаще зерна имеют конформные и микростилолитовые контакты.

Песчаники верхней части зилаирской свиты сложены плагиоклазами, пироксенами, роговой обманкой и зернами пород. По соотношению зерен относятся к полевошпатовым грауваккам.

Кварц (0–4%) редок. Характеризуется плохой окатанностью, изометричной и незначительно удлиненной формой. Погасание имеет равномерное.

Плагиоклазы (15–11%) преимущественно изометричны и удлиненные, иногда весьма удлиненные прямоугольные с острыми или сколотыми углами. Встречаются кристаллы неправильной угловатой формы. Незначительно пелитизированы. Обычны полисинтетические двойники с различной шириной полос.

Пироксены и роговая обманка (0–2%, редко 8%) встречаются в незначительном количестве. По морфологическим особенностям близки к таковым из нижней пачки свиты. В некоторых образцах окварцованы.

Обломки пород (59–82%) представлены магматическими разностями. Преобладают фельзитовые и микролитовые структуры, характерные для пород кислого состава. Не меньшее значение имеют субвулканические, преимущественно плагиоклазовые породы. Присутствуют также обломки эффузивов с интерсертальной и порфиroidной структурами.

Обломки метаморфических пород единичны. К ним отнесены эпидотовые, кварц-мусковитовые, кварц-эпидотпумпеллии-товые, кварц-пренитовые, хлорит-биотитовые агрегаты, серпентиниты и кварциты.

Сортировка средняя. Зерна плотно прилегают друг к другу. Характерны их конформные и стилолитоподобные контакты. Цемент хлоритовый, частично эпидотовый.

4. Сравнительная характеристика и генезис средне-верхнедевонских песчаников по петрографическим данным

На классификационной диаграмме В.Д. Шутова подавляющее большинство фигуративных точек состава средне- и верхнедевонских песчаников расположилось в полях граувакк и полевошпатовых граувакк. Эти поля отвечают третьему тектоно-полимиктовому уровню диаграммы (см. рис. 4). Песчаники этого уровня, согласно В.Д. Шутову [11], накапливаются в условиях высокой тектонической активности.

Важную информацию о процессах смешения обломочного материала из разных источников сноса дает анализ ориентации кластеров на классификационной диаграмме В.Д. Шутова относительно ее границ и границ полей.

Кластеры, отвечающие составу всех изученных песчаников, кроме граувакк верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты, ориентированы параллельно нижней стороне треугольника и границе полевошпатовых и кварцево-полевошпатовых граувакк. Согласно В.Д. Шутову, это может свидетельствовать о несмешанном составе обломочного материала.

Песчаники верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты являются исключением по соотношению зерен разного состава. Соответствующие им точки сгруппировались на диаграмме в неориентированный кластер, что можно трактовать как признак смешения обломочного материала из разных источников сноса.

Точки, соответствующие составу песчаников ирендыкской и улутауской свит, на вспомогательной треугольной диаграмме сконцентрированы около вершины со 100%-ным содержанием зерен магматических пород (см. рис. 4). Прочие разности заметно обогащены зернами осадочных и особенно метаморфических пород. Наибольшее содержание последних выявлено в отложениях верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты.

Песчаники ирендыкской, улутауской и зилаирской свит имеют несколько общих особенностей. Во-первых, их петрографический состав однообразен. Набор основных компонентов не велик. Выделяются две ассоциации зерен: плагиоклазы + обломки вулканитов средне-основного состава, плагиоклазы + обломки вулканитов средне-основного состава + клинопироксены + роговая обманка. Во-вторых, плагиоклазы в них не окатаны¹, пироксены (если присутствуют) имеют идиоморфные очертания или форму осколков. В-третьих, вкрапленники плагиоклаза в зернах порфиритов выходят за контуры самих зерен (торчат из зерен). В-четвертых, некоторые кристаллы плагиоклазов и пироксенов отколоты

¹ Степень окатанности обломков в вулканитовых кластолитах рекомендуется оценивать по плагиоклазам, поскольку зерна вулканитов и кварца изначально могут иметь округлую форму, не имеющую отношения к механической обработке в водотоках [12].

поперек двойниковых швов. В-пятых, встречаются рогульки. Эти признаки, согласно ([12–14] и др.), характерны для тефрогенных песчаников.

С достаточной степенью уверенности можно предполагать, что песчаники ирендыкской, улутауской и зилаирской свит изученного разреза являются тефроидами (тефротурбидитами). Мобилизация слагающего их обломочного материала обусловлена эксплозивным вулканизмом.

Песчаники нижней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты в составе имеют зерна вулканитов разного состава. Среди них преобладают средние и основные разности. Примесь обломков осадочных и метаморфических пород существенна (см. рис. 4). Зерна осадочных пород, по всей вероятности, были захвачены турбидными и обломочными потоками со дна бассейна (интракласты). Метаморфические разности, видимо, сформированы при метаморфизме низких ступеней по глинисто-алевролитовым породам и вулканитам среднего или основного состава. Кварц в песчаниках имеет морфологические признаки вулканического происхождения. Изложенное позволяет предполагать, что песчаники нижней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты сложены вулканотерригенным и отчасти тефрогенным материалом. Накопление их протекало одновременно с вулканизмом, что согласуется с развитием в Магнитогорской мегазоне вулканитов – возрастных аналогов биягодинской свиты [1], например бугодакской свиты на севере Западно-Магнитогорской зоны.

Песчаники верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты явно имеют смешанный состав. Помимо обломков вулканитов, в том числе метаморфизованных, в них содержатся зерна серпентинитов и типично метаморфических пород – кварцитов, кварц-серицитовых, кварц-хлоритовых и других сланцев. Вместе с этим в песчаниках этой группы есть глинисто-алевритовый матрикс, а в переслаивании с ними – глинистые сланцы. Это свидетельствует о проявлении процессов химического выветривания в источнике сноса. По всей видимости, учитывая комплекс вышеприведенных признаков, песчаники верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты можно отнести к терригенным. В источнике их сноса разрушались вулканогенные, осадочные и метаморфические породы, в том числе серпентиниты.

Полученные данные наглядно свидетельствуют о существенных изменениях в составе и генезисе обломочных пород на рубеже франского и фаменского веков. В это время на фоне практически повсеместного господства тефрогенной кластики в осадочном бассейне накапливались продукты размыва не только вулканических, но осадочных и метаморфических пород. Особенно важно отметить, что поступление этого материала было кратковременным (см. рис. 2), но весьма интенсивным: мощность отложений верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты возрастает в южном направлении до 1700 м (разрез у оз. Ялангас-Куль).

Формирование вулканотерригенных и терригенных пород смешанного состава связано с коллизионными процессами [8, 15, 16], тогда как их массовое и скоротечное поступление, по всей видимости, вызвано резким падением уровня моря, зафиксированным повсеместно и известным как глобальное событие *Upper Kellwasser* [17].

5. Геохимические особенности девонских песчаников

В настоящее время для характеристики состава и реконструкций обстановок седиментации обломочных пород широко применяются диаграммы, в основу которых положены величины и соотношения содержаний оксидов породообразующих (главных) элементов. Некоторые, в том числе наиболее применяемые диаграммы были построены по результатам определения химического состава исследуемых пород.

Диаграммы Ф. Петтиджона $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [18] и М. Херрона $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ [19] (рис. 5) являются классификационными, то есть служат непосредственно для идентификации пород. На первой диаграмме большинство точек, соответствующих составу песчаников всех исследуемых стратиграфических подразделений, расположилось в поле граувакк, на второй – в поле железистых сланцев, что свойственно девонским кластолитам ЗМЗ [20].

А.Г. Коссовской и М.И. Тучковой была предложена треугольная диаграмма $\text{SiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ [21], позволяющая, с одной стороны, установить петротип песчаников (кварцевые, олигомиктовые, полимиктовые или вулканокластитовые) (см. рис. 5), а с другой – судить о содержании в них кварца, полевых шпатов и темноцветных минералов. Фигуративные точки состава всех изученных проб на данной диаграмме слились в единый кластер в поле вулканокластитовых разностей. Отличия песчаников, относящихся к отдельным стратиграфическим подразделениям, в целом незначительны и состоят в следующем. Составы граувакк ирендыкской свиты варьируют в широких пределах, преимущественно по содержанию оксидов железа и магния, что коррелируется с содержаниями пироксенов. Относительно повышенные содержания оксидов натрия, кальция и алюминия в песчаниках улутауской свиты позволяют предполагать их обогащение полевыми шпатами, при этом не только в виде кристаллокластики, но и в качестве вкрапленников в зернах порфиринов. Песчаники биягодинской свиты характеризуются повышенными содержаниями кремнезема, что вызвано присутствием в сравнительно больших количествах кварца, обломков кремней, кварцитов и кислых вулканигов. Граувакки зилаирской свиты в большинстве своем обогащены оксидами железа и магния, что обусловлено присутствием кристаллокластики пироксенов и роговой обманки.

Аналогично с охарактеризованными выше диаграммами к разряду классификационных относится недавно предложенная О.Ю. Мельничуком [22] диаграмма $\lg[(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{total}} + \text{MgO})/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] - \lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (см. рис. 5). По соотношению указанных параметров средне-верхнедевонские песчаники профиля д. Тирман – д. Идяш-Кускарово – д. Ишкулово относятся к грауваккам. Это заключение лишь отчасти согласуется с петрографическими данными, поскольку точки, отвечающие составу полевошпатовых граувакк, практически не попали на диаграмме О.Ю. Мельничука в «свое» поле.

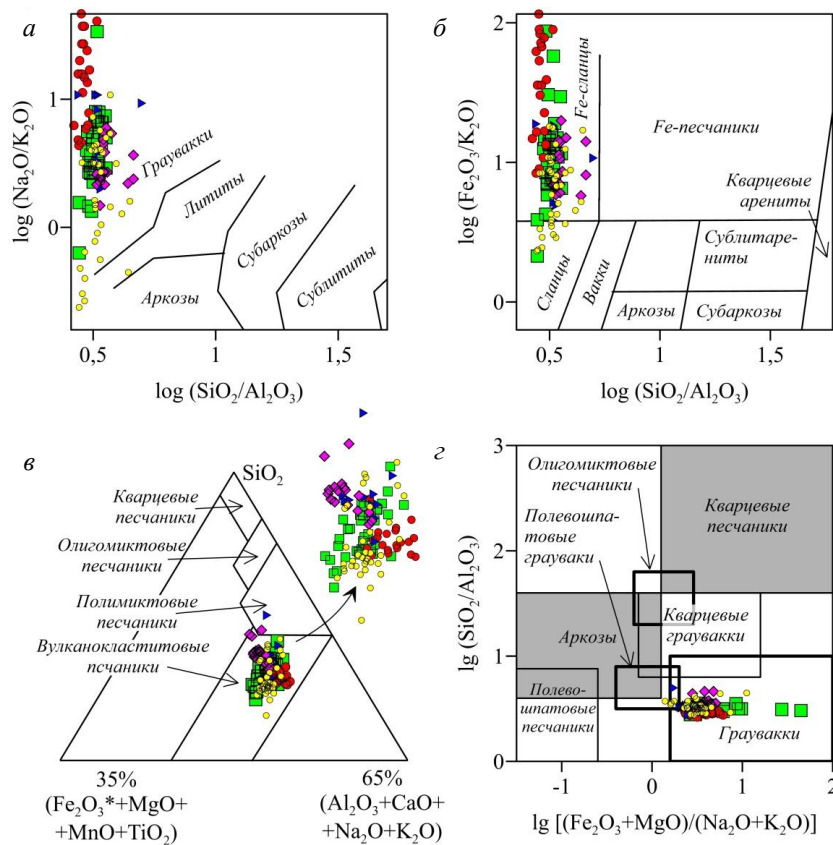


Рис. 5. Классификационные диаграммы Ф. Петтиджона (а) [18], М. Херрона (б) [19], А.Г. Коссовской и М.И. Тучковой (в) [21], О.Ю. Мельничука (з) [22] для средне-верхнедевонских песчаников профиля д. Тирман – д. Ишкулово

Диаграммы F1 – F2 и F3 – F4 по [23]² позволяют распознать обогащенные кварцем рециклированные отложения и вулканокластические разности кислого, среднего и основного составов.

Фигуративные точки состава девонских песчаников расположились на диаграммах F1 – F2, F3 – F4 преимущественно в поле магматических пород основного состава (рис. 6). Кроме того, существенное количество точек, соответствующих песчаникам ирендыкской, биягодинской и зилаирской свит, попало в поле богатых кварцем осадочных образований. Эти результаты явно противоречат петрографическим данным и по этой причине в последующем не учтены.

Диаграмма Т. Кусуноки и М. Мусашино $(FeO^* + MgO)/(Al_2O_3 + K_2O) - SiO_2$ по [24] крайне редко встречается в русско- и англоязычной литературе. Она разработана для вулканокластических отложений и несет четыре основных поля: базальты, андезиты, диориты и риолиты (см. рис. 4). Применение ее в отношении песчаников верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты, учитывая их

² F1 = $-1.773 \cdot TiO_2 + 0.607 \cdot Al_2O_3 + 0.76 \cdot Fe_2O_{3общ} - 1.5 \cdot MgO + 0.616 \cdot CaO + 0.509 \cdot Na_2O - 1.224 \cdot K_2O - 9.09$;
 F2 = $0.445 \cdot TiO_2 + 0.07 \cdot Al_2O_3 - 0.25 \cdot Fe_2O_{3общ} - 1.142 \cdot MgO + 0.438 \cdot CaO + 1.475 \cdot Na_2O + 1.426 \cdot K_2O - 6.861$;
 F3 = $30.638 \cdot TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \cdot Fe_2O_{3общ}/Al_2O_3 + 7.329 \cdot MgO/Al_2O_3 + 12.031 \cdot Na_2O/Al_2O_3 + 35.402 \cdot K_2O/Al_2O_3 - 6.382$;
 F4 = $56.5 \cdot TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \cdot Fe_2O_{3общ}/Al_2O_3 + 30.875 \cdot MgO/Al_2O_3 - 5.404 \cdot Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \cdot K_2O/Al_2O_3 - 3.89$.

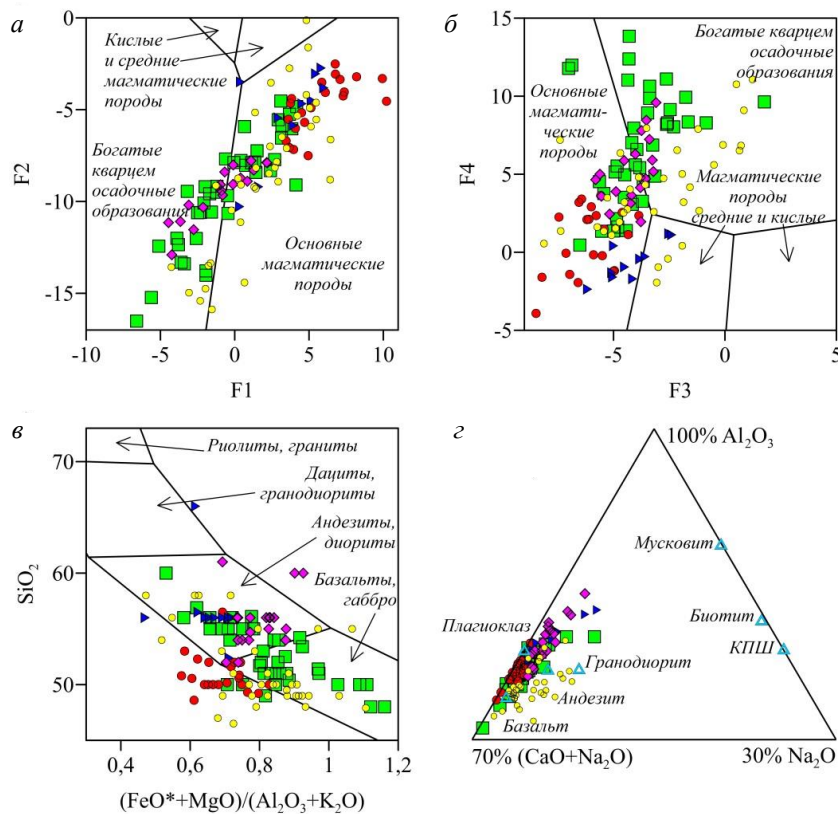


Рис. 6. Диаграммы состава Б. Роузера и Р. Корша (а, б) [23], Т. Кусуноки и М. Мусашино (в) [24] и А – CN – К У. Несбитта и Г. Янга (г) [25] для средне-верхнедевонских песчаников профиля д. Тирман – д. Ишкулово. Положение голубых треугольников характеризует состав некоторых пород и минералов. Остальные условные обозначения см. рис. 4. Формулы для F1, F2 и F3, F4 приведены в сноске 2

смешанный состав, не представляется целесообразным. Расположение фигуративных точек состава песчаников остальных стратиграфических подразделений на диаграмме Кусуноки – Мусашино в целом соответствует петрографическим данным: все они близки по составу к базальтам и андезитам. При этом разности ирендыкской и зилаирской свит, богатые пироксеном и/или роговой обманкой, имеют повышенные значения отношения $(\text{FeO}^* + \text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})$.

Диаграмма А – CN – К (см. рис. 6) [25] служит для характеристики интенсивности процессов выветривания в источнике сноса обломочного материала. Процессы выветривания обуславливают вынос из осадков растворимых элементов, в данном случае кальция и натрия, и концентрацию гидролизатов – алюминия. Таким образом, при увеличении влияния гипергенных процессов на состав осадочных пород соответствующие им точки смещаются сначала к правому ребру треугольника, а затем к его вершине со 100%-ным содержанием оксида алюминия. Фигуративные точки состава всех песчаников расположились вдоль левой стороны треугольника, соответствующей составам невыветрелых магматических пород. Сопряженный с диаграммой А – CN – К химический индекс выветривания CIA ($\text{CIA} = (100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) рассчитывается

по молекулярным количествам [25] и колеблется в интервале 35–65. Данные значения свойственны магматическим породам, не претерпевшим интенсивного химического выветривания.

К настоящему моменту предложено множество диаграмм, позволяющих с разной степенью вероятности предполагать геодинамическую позицию седиментационного бассейна по соотношению породообразующих элементов в песчаниках. Известны работы, подвергающие их критике и показывающие применимость одних диаграмм и несостоятельность других [26–30]. Ранее на примере отложений улутауской свиты и вулканитов урлядинской толщи было показано, что наиболее реалистичные результаты можно получить, применяя следующие диаграммы: $Al_2O_3/(CaO + Na_2O) - K_2O/Na_2O$ по [31, 32]; $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ по [33], $SiO_2 - K_2O/Na_2O$ по [34]; F1 – F2 по [31]³; DF1 – DF2 по [35]⁴. Для их построения необходимо использовать песчаники с содержанием кремнезема менее 63% [32]. Последнему условию отвечают все имеющиеся в нашем распоряжении пробы.

На указанных выше диаграммах подавляющее большинство точек расположилось в полях, отвечающих составу песчаников собственно островных дуг или энсиматических островных дуг (рис. 7). Это соответствует результатам ранее проведенных вулканологических и палеогеодинамических исследований [15, 37–39].

В поля, отвечающие прочим геодинамическим обстановкам, попали единичные точки, что можно расценивать как случайность. Исключением являются некоторые пробы из отложений зилаирской свиты. Ввиду относительно повышенного содержания в них K_2O , связанного, вероятно, с вторичными процессами, фигуративные точки их состава расположились в полях иных геодинамических обстановок или вне каких-либо полей.

Построение диаграмм показало, что по соотношению породообразующих элементов изученные кластолиты относятся к грауваккам энсиматических островных дуг. Они не претерпели интенсивного химического выветривания, различия их в целом несущественны и вызваны разницей в содержании зерен пород и кристаллокластики (плагиоклазы, пироксены, роговая обманка). Данное заключение согласуется и дополняет результаты предшествующих работ [32, 36–39, 41–46]⁵.

³ $F1 = 0.303 - 0.0447 \cdot SiO_2 - 0.972 \cdot TiO_2 + 0.008 \cdot Al_2O_3 - 0.267 \cdot Fe_2O_3 + 0.208 \cdot FeO - 3.082 \cdot MnO + 0.14 \cdot MgO + 0.195 \cdot CaO + 0.719 \cdot Na_2O - 0.032 \cdot K_2O + 7.51 \cdot P_2O_5$; $F2 = 43.57 - 0.421 \cdot SiO_2 + 1.988 \cdot TiO_2 - 0.526 \cdot Al_2O_3 - 0.551 \cdot Fe_2O_3 - 1.61 \cdot FeO + 2.72 \cdot MnO + 0.881 \cdot MgO - 0.907 \cdot CaO - 0.177 \cdot Na_2O - 1.84 \cdot K_2O + 7.244 \cdot P_2O_5$.

⁴ $DF1_{SiO_2 < 65\%} = 0.608 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} - 1.854 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 0.299 \cdot \ln(Fe_2O_{3\text{общ}}/SiO_2)_{adj} - 0.55 \cdot \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0.12 \cdot \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.194 \cdot \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1.51 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 1.941 \cdot \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.003 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 0.294$;

$DF2_{SiO_2 < 65\%} = -0.554 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} - 0.995 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.765 \cdot \ln(Fe_2O_{3\text{общ}}/SiO_2)_{adj} - 1.391 \cdot \ln(MnO/SiO_2)_{adj} - 1.034 \cdot \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.225 \cdot \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 0.713 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0.33 \cdot \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.637 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 3.631$.

Индекс “adj” обозначает, что расчет ведется по содержаниям оксидов, пересчитанным на их суммарную концентрацию в 100%.

⁵ Важно отметить, что детальная характеристика девонских кластолитов изложена в этих работах и в многочисленных отчетах производственных организаций. Однако приведенный в них фактический материал здесь не рассматривался, поскольку получен он в разные годы, разными методами, характеризует разные стратиграфические подразделения и территории, а образцы иногда не привязаны к разрезу или местности.

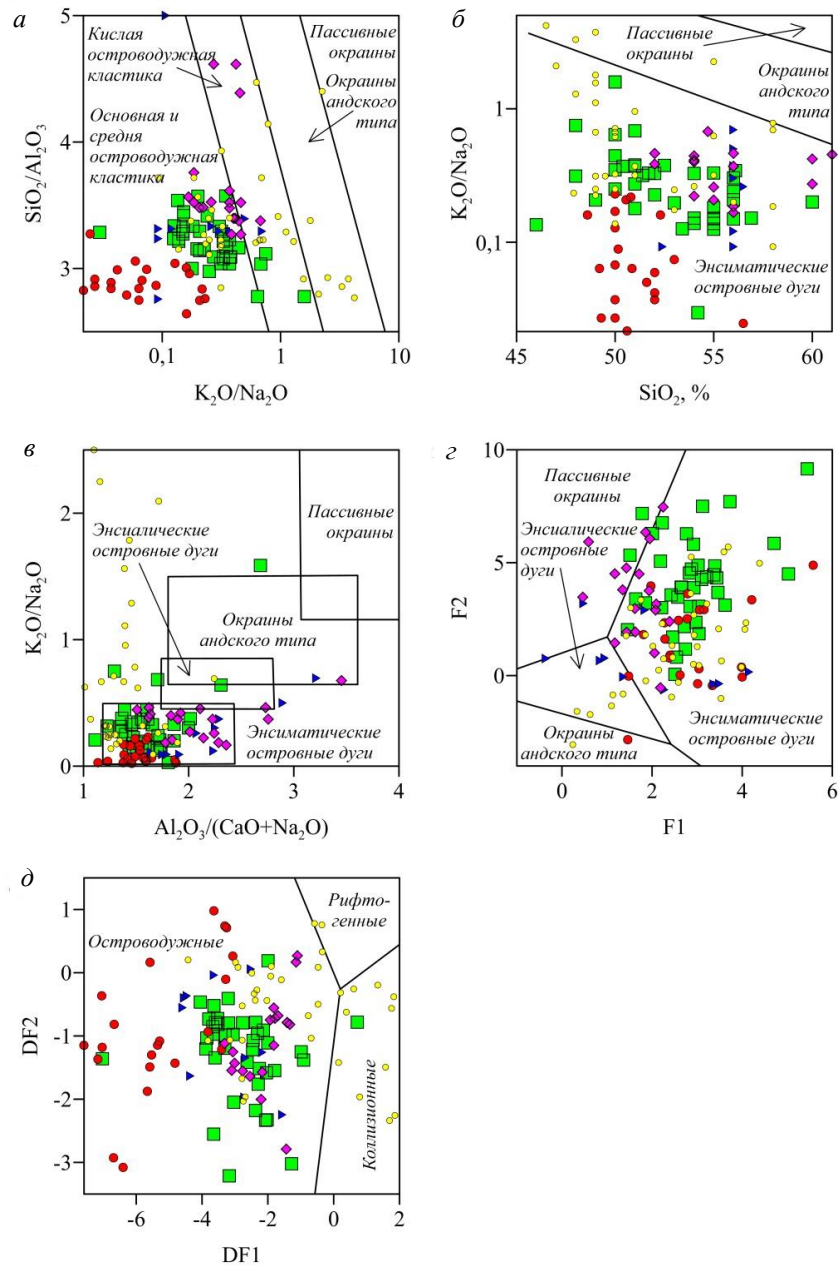


Рис. 7. Диаграммы Дж.Б. Мейнарда (а) [33], Б. Роузера и Р. Корша (б) [34], М. Бхатии (в, г) [31] и Дж. Армстронга-Алтрина и С. Верма (д) [35] для средне-верхнедевонских песчаников профиля д. Тирман – д. Идяш-Кускарово – д. Ишкулово. Условные обозначения см. рис. 4. Формулы для F1, F2 и DF1, DF2 приведены в сносках 3 и 4

6. Отличительные особенности песчаников разных стратиграфических интервалов

Анализ вариаций содержаний и отношений породообразующих элементов, Cr, Co и Ni показал, что граувакки разных стратиграфических подразделений, несмотря на близкий состав, возможно отличать друг от друга.

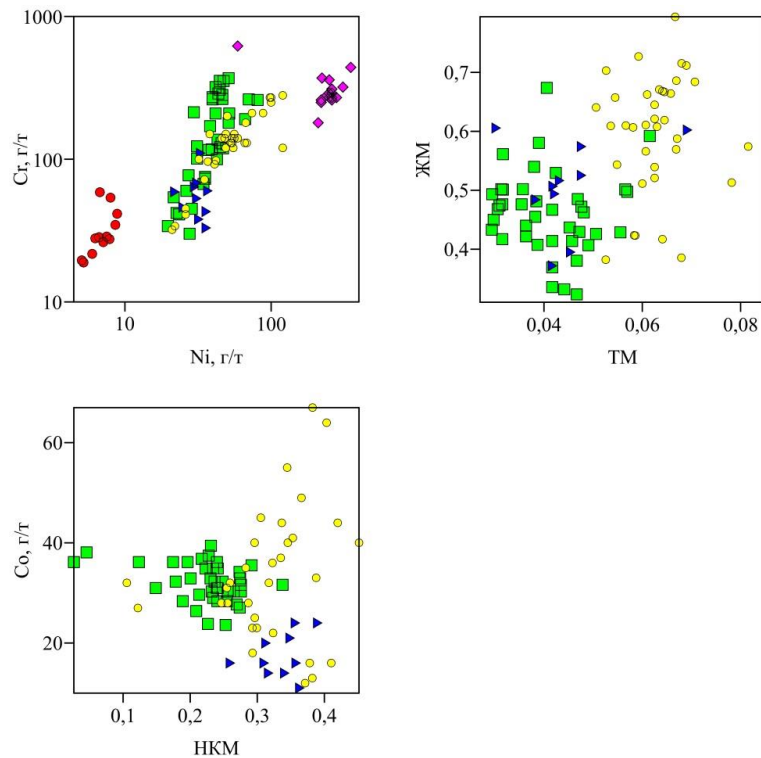


Рис. 8. Диаграммы, позволяющие различать граувакки разных свит по геохимическим данным. Условные обозначения см. рис. 4

Наиболее контрастны вариации содержаний Ni и Cr. Минимальные концентрации этих элементов (далее в г/т) свойственны песчаникам улутауской свиты, соответственно 5–9 и 19–59, а максимальные – песчаникам верхней пачки нижней подсвиты бягодинской свиты – 210–352 и 180–40 соответственно.

Вынесение на диаграмму Ni – Cr (рис. 8) фигуративных точек состава средне-верхнедевонских граувакк позволяет отличить песчаники двух указанных стратонив от прочих, кластеры которых сливаются в центральной части диаграммы.

Дальнейший анализ геохимических характеристик граувакк ирендыкской, зилаирской свит и нижней пачки нижней подсвиты бягодинской свиты показал, что их можно разделять по величинам титанового (ТМ)⁶, железного (ЖМ), натрий-калиевого (НКМ) модулей и по содержанию кобальта. Для отличия граувакк этих стратиграфических подразделений наиболее удобны диаграммы ТМ – ЖМ и НКМ – Со (см. рис. 8).

Заключение

Проведенные петрографические и геохимические исследования средне- и верхнедевонских обломочных пород ЗМЗ позволили сделать следующие выводы.

1. Выявлены две разновидности обломочных пород в ирендыкской свите, отличающиеся по соотношению содержаний кристалло- и литокластики.

⁶ Формулы расчета литохимических модулей по [47]: $ТМ = TiO_2/Al_2O_3$, $ЖМ = (FeO + Fe_2O_3 + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$, $НКМ = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$.

2. Установлено двучленное строение нижней подсвиты биягодинской свиты и зилаирской свиты, обусловленное изменениями состава пород в источниках сноса.

3. Уточнена принадлежность обломочных пород разных свит к разным генетическим типам отложений, выделяемым по происхождению обломочного материала. Песчаники ирендыкской, улутауской и зилаирской свит являются тефроидами, то есть их накопление вызвано перемещением продуктов эксплозий (тефры). Песчаники нижней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты относятся к вулканотерригенным. Учитывая их накопление одновременно с вулканизмом (бугодакская свита), можно предполагать присутствие в них тефрогенной примеси. Песчаники верхней пачки нижней подсвиты биягодинской свиты – терригенные. Они сложены обломками вулканогенных, осадочных и метаморфических пород.

3. Все изученные граувакки по соотношению главных элементов соответствуют вулканокластическим грауваккам, сформированным в акватории энсиматической островной дуги. Интенсивного химического выветривания при мобилизации и транспортировке обломочный материал не претерпел.

4. Граувакки всех изученных стратиграфических подразделений близки по геохимическим параметрам. Отличить их возможно посредством анализа содержания Cr, Co, Ni и величин ТМ, ЖМ и НКМ.

5. Изменение состава обломочных пород на рубеже франского и фаменского веков (смешанный состав, увеличение содержания Cr, Ni) является проявлением коллизионных процессов, а высокая интенсивность накопления обломочного материала в это время сопряжена с глобальным событием *Upper Kellwasser*.

Проведенные исследования основаны на большом количестве проб – из каждой свиты было изучено несколько десятков образцов. Этот подход позволил получить статистически более обоснованные результаты, выявить неизвестные ранее детали строения разреза и установить отличительные особенности граувакк разных свит.

Благодарности. Исследования выполнены по теме государственного задания № 0246-2019-0118.

Автор благодарен студентам кафедры геологии и полезных ископаемых Башкирского государственного университета И.Х. Хаиртдинову, А. А. Гилязову и водителю Института геологии УФИЦ РАН И.М. Мунасипову за неоценимую помощь при проведении полевых работ.

Литература

1. Маслов В.А., Артюшкова О.В. Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. – Уфа: Дизайнполиграфсервис, 2010. – 288 с.
2. Артюшкова О.В. Девонские конодонты из вулканогенно-кремнистых отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – 152 с.
3. Хворова И.В., Ильинская М.Н. Сравнительная характеристика двух вулканогенно-осадочных формаций Южного Урала // Вулканогенно-осадочные и терригенные формации. – М.: Изд-во Акад. наук, 1963. – С. 87–160.

4. *Зайнуллин Р.И.* Состав и особенности формирования вулканокластических отложений нижнего девона Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // *Литосфера*. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 78–94.
5. *Фазлиахметов А.М., Зайнуллин Р.И.* Вариации индикаторных геохимических параметров на примере ниже- и среднедевонских вулканитовых песчаников Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // *Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та*. – 2014. – № 1. – С. 56–62.
6. *Фазлиахметов А.М.* Геохимические особенности и условия образования раннедевонских кремнисто-глинистых сланцев разреза Ишкильдино и подстилающих их базальтов (восточный склон Южного Урала) // *Литосфера*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 30–47.
7. *Becker R.T., Gradstein F.M., Hammer O.* The Devonian period // *The Geological Time Scale 2012*. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – P. 559–601.
8. *Mizens G.* Devonian palaeogeography of the Southern Urals // *Geol. Q.* – 2004. – V. 48, No 4. – P. 205–215.
9. *Хворова И.В., Елисеева Т.Г.* Вулканогенные обломочные (псаммитовые) породы улугауской свиты // *Литология и полезные ископаемые*. – 1965. – № 1. – С. 53–69.
10. *Мизенс Г.А.* Седиментационные бассейны и геодинамические обстановки в позднем девоне ранней перми юга Урала. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. – 192 с.
11. *Шутов В.Д.* Классификация песчаников // *Литология и полезные ископаемые*. – 1967. – № 5. – С. 86–103.
12. *Хворова И.В.* Вулканизм и осадкообразование // *Литология в исследованиях Геологического института АН СССР*. – М.: Наука, 1980. – С. 9–55.
13. *Малеев Е.Ф.* Вулканыты: Справочник. – М.: Недра, 1980. – 240 с.
14. *Шванов В.Н.* Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). – Л.: Недра, 1987. – 269 с.
15. *Пучков В.Н.* Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. – Уфа: Даурия, 2000. – 146 с.
16. *Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Y., Juhlin C.* Arc-continent collision in the Southern Urals // *Earth-Sci. Rev.* – 2006. – V. 79, No 3–4. – P. 261–287. – doi: 10.1016/j.earscirev.2006.08.003.
17. *Walliser O.H.* Global events in the Devonian and Carboniferous // *Global Events and Event Stratigraphy in the Paleozoic*. – Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer, 1996. – P. 225–250.
18. *Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and Sandstone. – N. Y.: Springer, 1987. – 553 p.
19. *Herron M.M.* Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sediment. Petrol.* – 1988. – V. 58, No 5. – P. 820–829. – doi: 0.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D.
20. *Маслов А.В., Подковыров В.Н., Мизенс Г.А., Ножкин А.Д., Фазлиахметов А.М., Малиновский А.И., Худолей А.К., Котова Л.Н., Куцова А.В., Гареев Э.З., Зайнуллин Р.И.* Дискриминантные диаграммы для терригенных пород: опыт сравнения // *Геохимия*. – 2016. – № 7. – С. 579–595.
21. *Коссовская А.Г., Тучкова М.И.* К проблеме минералого-петрохимической классификации и генезиса песчаных пород // *Литология и полезные ископаемые*. – 1988. – № 2. – С. 8–24.
22. *Мельничук О.Ю.* Идентификация петротипов песчаников по литохимическому составу // *Литология и я: Материалы 3-й Всерос. шк. студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по литологии*. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2018. – С. 102–105.

23. *Roser B.P., Korsch R.J.* Provenance signature of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data // *Chem. Geol.* – 1988. – V. 67, No 1–2. – P. 119–139. – doi: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.
24. *Kusunoki T., Musashino M.* Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin // *Earth Sci. (Chikyū Kagaku).* – 2001. – V. 55, No 5. – P. 293–306. – doi: 10.15080/agcjchikyukagaku.55.5_293. (на яп. яз.)
25. *Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* – 1982. – V. 299. – P. 715–717. – doi: 10.1038/299715a0.
26. *Ryan K.M., Williams D.M.* Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins // *Chem. Geol.* – 2007. – V. 242, No 1–2. – P. 103–125. – doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.013.
27. *Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P.* Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings // *Sediment. Geol.* – 2005. – V. 177, No 1–2. – P. 115–129. – doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.004.
28. *Zaid S.M.* Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting // *J. Earth Syst. Sci.* – 2017. – V. 126. – Art. 103, P. 1–22. – doi: 10.1007/s12040-017-0873-4.
29. *Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S.* Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings // *Sediment. Geol.* – 2016. – V. 332. – P. 1–12. – doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.11.011.
30. *Verma S.P.* Road from Geochemistry to Geochemometrics. – Singapore: Springer Nat. Singapore Pte. Ltd., 2020. – 669 p.
31. *Bhatia M.R.* Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // *J. Geol.* – 1983. – V. 91, No 6. – P. 611–627. – doi: 10.1086/628815.
32. *Фазлиахметов А.М.* О применении геодинамических литохимических диаграмм при изучении тефрогенных песчаников // *Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330, № 7. – С. 34–43. – doi: 10.18799/24131830/2019/7/2174.
33. *Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-Sh.* Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin // *Spec. Publ. – Geol. Soc. London.* – 1982. – V. 10, No 1. – P. 551–561. – doi: 10.1144/GSL.SP.1982.010.01.36.
34. *Roser B.P., Korsch R.J.* Determination of tectonic settings of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // *J. Geol.* – 1986. – V. 94, No 5. – P. 635–650. – doi: 10.1086/629071.
35. *Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S.* New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // *Chem. Geol.* – 2013. – V. 355. – P. 117–133. – doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.
36. *Серавкин И.Б., Косарев А.М., Салихов Д.Н., Знаменский С.Е., Родичева З.И., Рыкус М.В., Сначев В.И.* Вулканизм Южного Урала. – М.: Наука, 1992. – 197 с.
37. *Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Геология и геодинамика Южного Урала (Опыт геодинамического картирования). – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. – 203 с.
38. *Brown D., Alvarez-Marron J., Perez-Estaun A., Puchkov V., Gorozhanina Y., Ayarza P.* Structure and evolution of the Magnitogorsk forearc basin: Identifying upper crustal processes during arc-continental collision in the southern Urals // *Tectonics.* – 2001. – V. 20, No 3. – P. 364–375. – doi: 10.1029/2001TC900002.
39. *Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б.* Петролого-геохимические особенности среднедевонско-раннекаменноугольных островодужных и коллизионных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // *Литосфера.* – 2006. – № 1. – С. 3–21.

40. *Смирнов Г.А., Смирнова Т.А., Ключина М.Л., Анфимов Л.В.* Материалы к палеогеографии Урала. Очерк 5. Франский век. – М.: Наука, 1974. – 218 с.
41. *Аржавитина М.Ю.* Особенности минерального состава терригенных пород зилаирской свиты Магнитогорского мегасинклиория // Минералого-геохимические особенности колчеданных месторождений, вулканогенных и осадочных образований Южного Урала. – Уфа: Ин-т геологии БФ АН СССР, 1978. – С. 48–55.
42. *Широбокова Т.И.* Петрохимические и геохимические особенности фаций среднедевонских обломочных пород Баймакского района // Палеовулканизм Урала. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. – С. 193–202.
43. *Мизенс Г.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю.* Редкие и редкоземельные элементы в девонских обломочных комплексах Магнитогорской мегазоны Южного Урала: концентрация, корреляционные связи и возможные минералы носители // Геохимия. – 2006. – № 5. – С. 501–521.
44. *Мизенс Г.А.* Редкие элементы и особенности источников сноса обломочного материала осадочных формаций девона и карбона в восточных зонах Южного Урала // Геохимия. – 2009. – № 12. – С. 1259–1278.
45. *Кокшина Л.В.* Глинистые минералы в цементе палеозойских граувакк: Магнитогорская мегазона (Южный Урал) и Боровская зона (юго-запад Западной Сибири) // Литосфера. – 2012. – № 2. – С. 33–42.
46. *Кокшина Л.В.* Особенности катагенеза девонских петрокластических граувакк Магнитогорской мегазоны (Южный Урал) // Литосфера. – 2013. – № 5. – С. 26–41.
47. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 412 с.

Поступила в редакцию
13.07.2020

Фазлиахметов Александр Маратович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории стратиграфии палеозоя

Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

ул. Карла Маркса, д. 16/2, г. Уфа, 450077, Россия
E-mail: famrb@mail.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114

**The Middle-Upper Devonian Sandstones
of the West Magnitogorsk Zone of the Southern Urals***A.M. Fazliakhmetov**Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, 450077 Russia**E-mail: famrb@mail.ru*

Received July 13, 2020

Abstract

To date, the composition of the Devonian sandstones of the West Magnitogorsk zone has been known from only a few samples. However, given the large thickness of the sections (up to the first kilometers), their number should be increased, up to several tens for every formation in each section.

The deposits of the Irendeyk, Ulutau, Biyagoda, and Zilair Formations were studied using 169 samples from a continuous section at the latitude of Magnitogorsk. In this paper, the results of the petrographic descriptions and analysis of the contents of rock-forming elements, chromium, cobalt, and nickel are presented and discussed.

According to the ratio of clastic grains in the Irendeyk Formation, two groups of rocks were distinguished – graywackes and feldspar graywackes; the two-membered structure of the lower subformation of the Biyagoda Formation and the Zilair Formation was established.

Based on the petrographic data, it was revealed that the clastic rocks belong to different genetic types. Sandstones of the Irendeyk, Ulutau, and Zilair Formations are tephroids, i.e., their accumulation is caused by tephra removal. Sandstones of the bottom part of the lower subformation of the Biyagoda Formation are volcanic-terrigenous, i.e., they consist of grains of lithified volcanics. Sandstones of the upper member of the lower subformation of the Biyagoda Formation are terrigenous, i.e., they are composed of fragments of volcanic, sedimentary, and metamorphic rocks.

The diagrams constructed as described by F. Pettijohn, M. Bhatia, B. Maynard, and other researchers demonstrated that the studied sandstones are similar in their geochemical parameters and can be identified as volcanoclastic graywackes formed in the waters of an oceanic island arc. The sediments underwent no intensive chemical weathering.

The graywackes were compared and it was shown that they differ in the contents of Cr, Co, Ni, as well as in the values of TiO_2/Al_2O_3 , $(FeO + Fe_2O_3 + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$, $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$, which can be used to justify the age of sediments that are not characterized by fauna.

The accumulation of the upper part of the lower subformation of the Biyagodya Formation is related to the collision and the global Upper Kellwasser Event.

The results obtained confirm the feasibility of sampling a large number of samples in individual sections.

Keywords: tephrogenic, volcanic-terrigenous, tefroturbidit, graywackes, Irendeyk Formation, Ulutau Formation, Biyagoda Formation, Zilair Formations, island arc, Upper Kellwasser

Acknowledgments. The study was performed within the state assignment no. 0246-2019- 0118.

Special thanks to I.Kh. Khairtdinov and A.A. Gilyazov, the students of the Department of Geology and Minerals of Bashkir State University, as well as to I.M. Munasipov, the driver of Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, for their invaluable assistance during the expedition.

Figure Captions

- Fig. 1. Geographical location of the study area (*a, b*) and sampling sites (*c-f*). Designations: 1 – sampling sites and their numbers; 2 – approximate position of the stratigraphic borders; 3 – contours (*a*) and cliffs (*b*); 4 – motor roads; 5 – rivers.
- Fig. 2. Lithological column of the Middle-Upper Devonian deposits along the profile of Tirman – Idyash-Kuskarovo – Ishkulovo as compared with the international stratigraphic scale [7]. Designations: 1 – psephytoliths with clasts larger than 10 mm; 2 – psephytoliths with clasts of 2–10 mm in size; 3 – sandstones; 4 – siltstones; 5 – argillites and argillaceous slates; 6 – flints and jaspers; 7 – basalts and andesibasalts; 8 – conodont findings by [1].
- Fig. 3. Pseudospheroidal weathering (desquamation) of the sandstones of the Ulutau Formation (on the left bank of the Bol'shoi Kizil River, from the north to the village of Tal-Kuskarovo; N 53°157.28", E 58°27'17.72").
- Fig. 4. V.D. Shutov's main (*a*) and additional (*b*) diagrams [11] from the Middle-Upper Devonian sandstones of the Tirman – Ishkulovo profile. Designations: 1 – Irendyk Formation; 2 – Ulutau Formation; 3, 4 – bottom (3) and upper (4) benches of the lower subformation of the Biyagoda Formation; 5 – Zilair Formation; 6–8 – first (6), second (7), and third (8) tectonic-polymictic levels of V.D. Shutov's diagram.
- Fig. 5. Classification diagrams by F. Pettijohn (*a*) [18], M. Herron (*b*) [19], A.G. Kossovskaya and M.I. Tuchkova (*c*) [21], O.Yu. Melnichuk (*d*) [22] for the Middle-Upper Devonian sandstones of the Tirman – Ishkulovo profile.
- Fig. 6. Composition diagrams by B. Roser and R. Korsch (*a, b*) [23], T. Kusunoki and M. Musashino (*c*) [24], and A–CN–K diagram by W. Nesbitt and G. Young (*d*) [25] for the Middle-Upper Devonian sandstones of the Tirman – Ishkulovo profile. Arrangement of blue triangles shows the composition of some rocks and minerals. For other designations, see Fig. 4. Formulae for F1, F2 and F3, F4 are given in footnote 2.
- Fig. 7. Diagrams by J. Maynard (*a*) [33], B. Roser and R. Korsch (*b*) [34], M. Bhatia (*c, d*) [31], J. Armstrong-Altrin and S. Verma (*e*) [35] for the Middle-Upper Devonian sandstones of the Tirman – Idyash-Kuskarovo – Ishkulovo profile. For designations, see Fig. 4. Formulae for F1, F2 and DF1, DF2 are given in footnotes 3 and 4.
- Fig. 8. Diagrams for distinguishing between the graywackes of different formations using geochemical data. For designations, see Fig. 4.

References

- Maslov V.A., Artyushkova O.V. *Stratigrafiya i korrelyatsiya devonskikh otlozhenii Magnitogorskoj megazony Yuzhnogo Urala* [Stratigraphy and Correlation of the Devonian Deposits of the Magnitogorsk Megazone of the Southern Urals]. Ufa, Dizainpoligrafservis, 2010. 288 p. (In Russian)
- Artyushkova O.V. *Devonskie konodonty iz vulkanogenno-kremnistykh otlozhenii Magnitogorskoj megazony Yuzhnogo Urala* [Devonian Conodonts from Volcanic-Sedimentary Deposits of the Magnitogorsk Megazone of the Southern Urals]. Ufa, DezainPress, 2014. 152 p. (In Russian)
- Khvorova I.V., Il'inskaya M.N. Comparative description of two volcanic-sedimentary formations of the Southern Urals. In: *Vulkanogenno-osadochnye i terrigennye formatsii* [Volcanic-Sedimentary and Terrigenous Formations]. Moscow, Izd. Akad. Nauk, 1963. pp. 87–160. (In Russian)
- Zainullin R.I. Composition and distinctive features of the Lower Devonian volcanoclastic sediments formation of the West Magnitogorsk zone, Southern Urals. *Litosfera*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 78–94. (In Russian)
- Fazliakhmetov A.M., Zainullin R.I. Variations of geochemical indicator parameters by the example of volcanoclastic sandstones of the Lower and Middle Devonian deposits of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Vestn. Irkutsk. Gos. Tekh. Univ.*, 2014, no. 1, pp. 56–62. (In Russian)
- Fazliakhmetov A.M. Geochemical features and formation conditions of the Early Devonian cherty-argillaceous shales and the underlying basalts in the Ishkildino section (eastern slope of the Southern Urals). *Litosfera*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 30–47. doi: 10.24930/1681-9004-2019-19-1-30-47. (In Russian)
- Becker R.T., Gradstein F.M., Hammer O. The Devonian period. In: *The Geological Time Scale 2012*. Amsterdam, Elsevier, 2012, pp. 559–601.

8. Mizens G. Devonian palaeogeography of the Southern Urals. *Geol. Q.*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 205–215.
9. Khvorova I.V., Eliseeva T.G. Volcaniclastic (psammite) rocks of the Ulutau Formation. *Litol. Polezn. Iskop.*, 1965, no. 1, pp. 53–69. (In Russian)
10. Mizens G.A. *Sedimentatsionnye basseiny i geodinamicheskie obstanovki v pozdnem devone rannei permi yuga Urala* [Sedimentary Basins and Geodynamic Settings in the Late Devonian of the Early Permian South of the Urals]. Yekaterinburg, IGG Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2002. 192 p. (In Russian)
11. Shutov V.D. Sandstone classification. *Litol. Polezn. Iskop.*, 1967, no. 5, pp. 86–103. (In Russian)
12. Khvorova I.V. Volcanism and sedimentation. In: *Litologiya v issledovaniyakh Geologicheskogo instituta AN SSSR* [Lithology in Studies of the Geological Institute of the Academy of Sciences of the USSR]. Moscow, Nauka, 1980. pp. 9–55. (In Russian)
13. Maleev E.F. *Vulkanity: Spravochnik* [Volcanic Rocks: A Handbook]. Moscow, Nedra, 1980. 240 p. (In Russian)
14. Shvanov V.N. *Petrografiya peschanykh porod (komponentnyi sostav, sistematika i opisaniye mineral'nykh vidov)* [Petrography of Sandy Rocks (Composition, Systematics, and Description of Mineral Species)]. Leningrad, Nedra, 1987. 269 p. (In Russian)
15. Puchkov V.N. *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Dauriya Publ., 2000. 146 p. (In Russian)
16. Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Y., Juhlin C. Arc-continent collision in the Southern Urals. *Earth-Sci. Rev.*, 2006, vol. 79, nos. 3–4, pp. 261–287. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.08.003.
17. Walliser O.H. Global events in the Devonian and Carboniferous. In: *Global Events and Event Stratigraphy in the Paleozoic*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1996, pp. 225–250.
18. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. *Sand and Sandstone*. New York, Springer, 1987. 553 p.
19. Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.*, 1988, vol. 58, pp. 820–829. doi: 0.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D.
20. Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Mizens G.A., Nozhkin A.D., Fazliakhmetov A.M., Malinovsky A.I., Khudoley A.K., Kotova L.N., Kuptsova A.V., Gareev E.Z., Zainullin R.I. Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: A comparison. *Geochem. Int.*, 2016, vol. 54, no. 7, pp. 569–583. doi: 10.1134/S0016702916060033.
21. Kossovskaya A.G., Tuchkova M.I. On the problem of mineralogical-petrochemical classification and genesis of sandy rocks. *Litol. Polezn. Iskop.*, 1988, no. 2, pp. 8–24. (In Russian)
22. Melnichuk O.Yu. Identification of petrotypes of sandstones by lithochemical composition. *Litologiya i ya. Materialy 3-i Vserossiiskoi shkoly studentov, aspirantov, molodykh uchennykh i spetsialistov po litologii* [Lithology and Me. Proc. 3rd All-Russ. Sch. of Students, Graduate Students, Young Scientists, and Lithologists]. Yekaterinburg, IGG Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2018. pp. 102–105. (In Russian)
23. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signature of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chem. Geol.*, 1988, vol. 67, nos. 1–2, pp. 119–139. doi: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.
24. Kusunoki T., Musashino M. Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin. *Earth Sci.* (Chikyu Kagaku), 2001, vol. 55, no. 5, pp. 293–306. doi: 10.15080/agcjchikyukagaku.55.5_293. (In Japanese)
25. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717. doi: 10.1038/299715a0.
26. Ryan K.M., Williams D.M. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chem. Geol.*, 2007, vol. 242, nos. 1–2, pp. 103–125. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.013.
27. Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sediment. Geol.*, 2005, vol. 177, nos. 1–2, pp. 115–129. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.004.

28. Zaid S.M. Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *J. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 126, art. 103, pp. 1–22. doi: 10.1007/s12040-017-0873-4.
29. Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sediment. Geol.*, 2016, vol. 332, pp. 1–12. doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.11.011.
30. Verma S.P. *Road from Geochemistry to Geochemometrics*. Singapore, Springer Nat. Singapore Pte. Ltd., 2020. 669 p.
31. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.*, 1983, vol. 91, no. 6, pp. 611–627. doi: 10.1086/628815.
32. Fazliakhmetov A.M. On application of geodynamic lithochemical diagrams in studying tefrogenic sandstones. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Inzhiniring Geoesur.*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 34–43. (In Russian)
33. Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin. *Spec. Publ. – Geol. Soc. London*, vol. 10, no. 1, pp. 551–561. doi: 10.1144/GSL.SP.1982.010.01.36.
34. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic settings of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, 1986, vol. 94, no. 5, pp. 635–650. doi: 10.1086/629071.
35. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem. Geol.*, 2013, vol. 355, pp. 117–133. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.
36. Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N., Znamensky S.E., Rodichesva Z.I., Rykus M.V., Snachev V.I. *Vulkanizm Yuzhnogo Urala [Volcanism of the Southern Urals]*. Moscow, Nauka, 1992. 197 p. (In Russian)
37. Yazeva R.G., Bochkarev V.V. *Geologiya i geodinamika Yuzhnogo Urala (Opyt geodinamicheskogo kartirovaniya) [Geology and Geodynamics of the Southern Urals (Efforts of Geodynamic Mapping)]*. Yekaterinburg, IGG Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 1998. 203 p. (In Russian)
38. Brown D., Alvarez-Marron J., Perez-Estaun A., Puchkov V., Gorozhanina Y., Ayarza P. Structure and evolution of the Magnitogorsk forearc basin: Identifying upper crustal processes during arc-continent collision in the southern Urals. *Tectonics*, 2001, vol. 20, no. 3, pp. 364–375. doi: 10.1029/2001TC900002.
39. Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. Petrologic-geochemical features of the Middle Devonian-Early Carboniferous island-arc and collision volcanics of the Magnitogorsk zone in the geodynamic context. *Litosfera*, 2006, no. 1, pp. 3–21. (In Russian)
40. Smirnov G.A., Smirnova T.A., Klyuzhina M.L., Anfimov L.V. *Materialy k paleogeografii Urala. Ocherk 5. Franskii vek [Materials on the Paleogeography of the Urals. Essay 5. The Frasnian]*. Moscow, Nauka, 1974. 218 p. (In Russian)
41. Arzhavitina M.Yu. The mineral composition of terrigenous rocks of the Zilair Formation of the Magnitogorsk megasynclinalorium. In: *Meneralogo-geokhimicheskie osobennosti kolchedannykh mestorozhdenii, vulkanogennykh i osadochnykh obrazovanii Yuzhnogo Urala [Mineralogical and Geochemical Features of Pyrite Deposits, Volcanic and Sedimentary Formations in the Southern Urals]*. Ufa, Inst. Geol. BF AN SSSR, 1978. pp. 48–55. (In Russian)
42. Shirobokova T.I. Petrochemical and geochemical features of the Middle Devonian detrital rock facies of the Baymak district. In: *Paleovulkanizm Urala [Paleovolcanism of the Urals]*. Sverdlovsk, UNTs Akad. Nauk SSSR, 1975, pp. 193–202. (In Russian)
43. Mizens G.A., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. Rare and rare-earth elements in the Devonian clastic complexes of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals: Concentration, correlations, and possible carrier minerals. *Geokhimiya*, 2006, no. 5, pp. 501–521. (In Russian)
44. Mizens G.A. Rare elements and features of the sources of demolition of clastic material of sedimentary formations of the Devonian and Carboniferous in the eastern zones of the Southern Urals. *Geokhimiya*, 2009, no. 12, pp. 1259–1278. (In Russian)
45. Kokshina L.V. Clay minerals in the Paleozoic graywackes cement: Magnitogorsk megazone (Southern Urals) and Borovsk zone (south-west of Western Siberia). *Litosfera*, 2012, no. 2, pp. 33–42. (In Russian)

-
46. Kokshina L.V. Catagenesis features of Devonian graywackes: Magnitogorsk megazone (Southern Urals). *Litosfera*, 2013, no. 5, pp. 26–41. (In Russian)
 47. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimicheskie i mineralogicheskie indicatory vulkanogennykh produktov v osadochnykh tolshchakh* [Geochemical and Mineralogical Indicators of Volcanic Products in Sedimentary Strata]. Yekaterinburg, Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2010. 412 p. (In Russian)
-

⟨ **Для цитирования:** Фазлиахметов А.М. Средне-верхнедевонские песчаники Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 1. – С. 88–114. – doi: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114. ⟩

⟨ **For citation:** Fazliakhmetov A.M. The Middle-Upper Devonian sandstones of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 1, pp. 88–114. doi: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114. (In Russian) ⟩