

Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 1. Минералого-петрографические подходы и методы

А. В. Маслов^{1,2}, О. Ю. Мельничук¹, Г. А. Мизенс¹, Ю. В. Титов³

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: amas2004@mail.ru

²Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2

³Филиал ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг" "КогалымНИПИнефть" в г. Тюмени, 628481, г. Когалым, ул. Центральная, 19/17

Поступила в редакцию 24.01.2019 г., принята к печати 11.04.2019 г.

Объект исследований. В первой статье из серии обзора методов реконструкции состава пород питающих провинций рассмотрены подходы и приемы интерпретации данных минералого-петрографического исследования песчаных пород, направленные на реконструкцию состава пород-источников обломочного материала (петрофонда). **Материалы и методы.** В качестве материала, иллюстрирующего особенности применения различных диаграмм, использованы данные подсчета количества различных типов аллотигенных компонентов каркаса песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала, а также сортымской свиты нижнего мела Большехетской впадины Западно-Сибирского осадочного мегабассейна. **Результаты.** Установлено распределение точек состава песчаников указанных литостратиграфических подразделений. **Выводы.** Выявлено, что только по составу пород кодинской, устькодинской и сортымской свит можно в той или иной мере обоснованно судить о составе размывавшегося во время их формирования петрофонда, тогда как состав псаммитов бирьянской подсвиты зильмердакской свиты и басинской свиты в существенной мере трансформирован.

Ключевые слова: песчаники, методы реконструкции состава пород-источников сноса, рифей, венд, верхний девон, нижний мел, Южный Урал, Средний Урал, Западно-Сибирский осадочный мегабассейн, Большехетская впадина

Благодарность

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту, учет советов и замечаний которого, несомненно, пошел данной публикации на пользу, а также искренне признательны Н.С. Глушковой, выполнившей иллюстрации к этой работе.

Исследования проведены в соответствии с темой № АААА-А18-118053090044-1 Государственного задания ИГГ УрО РАН.

Provenance reconstructions. Article 1. Mineralogical and petrographic approaches and methods

Andrey V. Maslov^{1,2}, Oleg Yu. Melnichuk¹, Gunar A. Mizens¹, Yury V. Titov³

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016 Russia, e-mail: amas2004@mail.ru

²Institute of Geology, Ufimian Federal Research Centre of RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa, 450077 Russia

³Branch of "LUKOIL-Engineering Ltd." "KogalymNIPIneft" in Tyumen, 19/17 Central'naya st., Kogalym, 628481 Russia

Received 24.01.2019, accepted 11.04.2019

Research subject. This is the first in the series of four articles, which aims to review existing provenance reconstruction tools. **Methods and materials.** The data obtained during evaluation of different sandstone allothigenous components was used as a basis for analysis. The data was collected from the Upper Riphean Zilmerdak Formation Bir'yan Member and the Upper Vendian Bassa Formation (Southern Urals); the Upper Devonian Kodinka and Ust'kodinka formations (Middle Urals); the Lower Cretaceous Sortym Formation (Western Siberian sedimentary megabasin, Bolshekhetskaya depression). **Results.** The sandstone composition patterns of the lithostratigraphic units under study allowed the most common prove-

Для цитирования: Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В. (2019) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 1. Минералого-петрографические подходы и методы. *Литосфера*, 19(6), 834–860. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-834-860

For citation: Maslov A.V., Melnichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V. (2019) Provenance reconstructions. Article 1. Mineralogical and petrographic approaches and methods. *Litosfera*, 19(6), 834–860. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-834-860

nance features to be established by means of comparing data obtained by various diagrams. *Conclusions.* It is established that only the Kodinka, Ust'kodinka and Sortym sandstone compositions can be used as a source for rock reconstruction analysis, while the Bir'yan and Basa sandstone compositions have undergone massive transformations.

Keywords: sandstones, provenance reconstruction methods, Riphean, Vendian, Upper Devonian, Lower Cretaceous, Southern Urals, Middle Urals, West Siberian sedimentary megabasin, Bolshekhetskaya depression

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to an anonymous reviewer for their valuable comments and recommendations, which have improved the overall quality of our paper. We also appreciate the contribution of N.S. Glushkova, who helped us to prepare illustrative materials.

The work was conducted within the framework of the project AAAA-A18-118053090044-1 of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление источников материала для формирования терригенных пород обычно предполагает применение подходов и методов из нескольких геологических дисциплин – седиментологии, стратиграфии, минералогии, геохимии, петрологии изверженных пород, геохронологии и др. Исследования в данном направлении ориентированы на выяснение расположения, природы и состава комплексов пород-источников обломочного материала (петрофонда), путей транспортировки последнего до конечных водоемов стока и факторов, которые влияют на состав терригенных пород (рельеф, климат, тектонические обстановки) (Граувакки, 1972; Петтиджон и др., 1976; Гринсмит, 1981; Петтиджон, 1981; Логвиненко, 1984; Blatt, 1985; Бергер, 1986; Graham et al., 1986; Шванов, 1987; Leitch, Cawood, 1987; Селли, 1989; Haughton et al., 1991; Кузнецов, 2011; Япаскурт, 2016; Sediment Provenance..., 2017; и др.).

Сведения об источниках обломочного материала играют важную роль в палеогеографических реконструкциях (в том числе и в областях со сложной тектоникой), в корреляции осадочных последовательностей и определении особенностей формирования их основных характеристик, анализе эволюции различных (рифтогенных, орогенных и др.) геологических систем, построении разнообразных тектонических и геодинамических моделей. Данные по составу пород-источников сноса для тонкозернистых обломочных/глинистых пород являются важным инструментом мониторинга состава и эволюции континентальной коры (Тейлор, МакЛеннан, 1988; Rudnick, Gao, 2003; и др.). Важную роль играют сведения о составе пород питающих провинций для разграничения различных осадочных систем в одном бассейне, а также для верификации палеоклиматических реконструкций. Незаменимы данные, получаемые в результате детальных исследований псаммитов, и для реконструкции истории формирования различных магматических комплексов, тектонических обстановок формирования осадочных последовательностей, а также общих зако-

номерностей формирования крупных фрагментов континентальной коры. В последнем случае важную роль играют также геохимические и изотопные характеристики тонкозернистых обломочных пород (установлено, что примерно 90% современной континентальной коры было сформировано уже к концу протерозоя, а примерно такой же процент постархейских осадочных образований является результатом рециклинга/каннибализма более древних пород (Veizer, Jansen, 1985; Haughton et al., 1991; и др.)).

В последние десятилетия традиционные петрографические методы реконструкции состава пород питающих провинций (путем изучения состава конгломератов, гравелитов и песчаников) все чаще дополняются литогеохимическими (анализом спектров распределения редкоземельных элементов, исследованием значений разнообразных индикаторных отношений редких и рассеянных элементов) и изотопно-геохимическими подходами (например, изучением Sm-Nd изотопной систематики глинистых пород и песчаников, датированием треков деления, установлением изотопного возраста обломочных цирконов, монацитов, апатитов, слюд и амфиболов) и др.

В наших сообщениях мы не будем касаться вопросов выяснения пространственного положения источников сноса, отсылая читателей к соответствующим работам (Батулин, 1947; Акимов, 1967; Гринсмит, 1981; Петтиджон, 1981; и др.), а также “традиционного” (Преображенский, Саркисян, 1954; Кухаренко, 1961; Акимов, Казак, 1965; Гриффитс, 1971; Логвиненко, 1984; Кузнецов, 2007; и др.) анализа минералов тяжелой фракции. Мы отдаем себе отчет и в том, что в силу многочисленности и разнообразия методов реконструкции состава пород на палеоводосборах, а также ограниченности объема статей они будут освещены в значительной степени неравномерно и, скорее всего, не все.

ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для наглядного представления материала на большинстве из приведенных в настоящих публи-

кациях диаграмм показано расположение фигуративных точек пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Башкирского мегантиклинория (западный склон Южного Урала), кодинской и устькодинской свит верхнего девона восточного склона Среднего Урала, а также верхней (валанжинской) части сортымской свиты Большехетской впадины Западно-Сибирского осадочного мегабассейна (рис. 1). Следует отметить, что в большей степени это касается настоящей и следующей за ней статей данного обзора, в которой будет рассмотрена реконструкция состава источников сноса по литогеохимическим данным. В этой связи ниже приведена характеристика не только песчаников, являющихся основным объектом данной статьи, но и глинистых пород, данные по которым проанализиро-

ваны в нашей следующей публикации (Маслов и др., 2020, в печати).

Бирьянская подсвита (мощность от 800 до 2500 м) является базальным подразделением зильмердакской свиты (Стратотип рифея..., 1983; Маслов, 1988). Она сложена преимущественно крупно- и среднезернистыми песчаниками с подчиненными прослоями гравелитов и мелкогалечных конгломератов, мелкозернистых песчаников, алевролитов и глинистых сланцев. Среди песчаников преобладают аркозовые, граувакково-аркозовые и полевошпато-кварцевые разности (Олли, 1948; Акимова, 1966; Маслов, 1983, 1990; Гареев, Маслов, 1992). Содержание кварца в песчаниках варьирует от 55 до 95%, обломков пород и полевых шпатов – соответственно от 2 до 30 и от 1–2 до 35%. Обломки пород в каркасе песчаников бирьянской под-

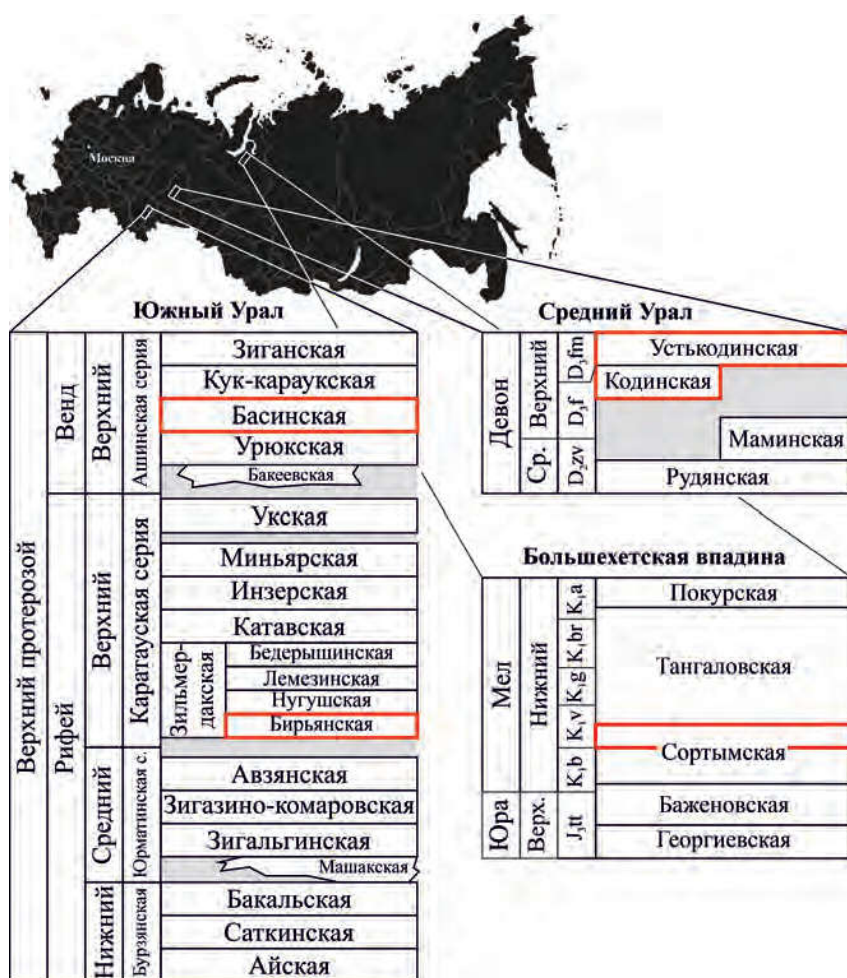


Рис. 1. Обзорная схема (основа заимствована с сайта <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>) и стратиграфическая принадлежность объектов (выделены красными контурами), иллюстрирующих основные положения настоящей и следующих статей данного обзора.

Fig. 1. Overview scheme (the basis is borrowed from the site: <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>) and the stratigraphic position of objects (marked with red contours), illustrating the main provisions of this and the following articles of this review.

свиты представлены в основном микрокварцитами различных структурных типов, кварцевыми песчаниками с крустификационным кварцевым цементом, кварцевыми и полевошпато-кварцевыми алевролитами, слюдистыми и слюдисто-кварцевыми сланцами, поликристаллическим кварцем, встречаются также фрагменты полициклического кварца с реликтами каевок регенерации. Иногда можно видеть микропегматиты, фрагменты микропертитовой структуры и основной массы кислых эффузивов (Маслов, 1983, 1990). Глинистые породы данного уровня стратотипа рифея принадлежат преимущественно хлороит-гидрослюдистым и гидрослюдистым сланцам (Маслов, 1988). Постседиментационные преобразования песчаников бирьянской подсвиты соответствуют в основном глубинному катагенезу (Кац, Генина, 1976; Анфимов, 1978, 1988; Кац, 1978; Маслов, 1983).

Басинская свита (до 1000 м) представлена преимущественно песчаниками, переслаивающимися с алевролитами и глинистыми сланцами. Псаммиты этой свиты, в соответствии с классификацией (Шутов, 1967; Граувакки, 1972), относятся в основном к кварцевым грауваккам¹; подчиненную роль играют кремнекласитово-кварцевые разности. Среди обломков пород преобладают эффузивы (вариолиты, диабазовые, плагиоклазовые и трахитовые порфириты), кварциты, микропегматиты, глинистые породы и кремни. Полевые шпаты представлены преимущественно плагиоклазами (Беккер, 1968). Основная ткань глинистых пород представлена тонкодисперсным микрочешуйчатым агрегатом гидрослюда и слабоокристаллизованного пелитового материала, интенсивно пигментированного тонкодисперсным гематитом. По данным (Сульман, Демчук, 1978), в глинистых породах данного уровня ашинской серии присутствуют Mg-Fe-хлорит и гидрослюда 2М. Постседиментационные преобразования песчаных пород свиты в целом соответствуют глубинному катагенезу с реликтами начального (Анфимов, 1988).

Кодинская и устькодинская свиты (мощность каждой порядка 1000 м) сложены песчаниками и аргиллитами, реже алевролитами и конгломератами. Пласты карбонатных пород редки, и встречаются в основном в разрезе кодинской свиты. Песчаники обеих свит по петрографическому составу отвечают петрокластическим кварц-полевошпатовым грауваккам (Мельничук, 2018а, б). Содержание зерен кварца в них составляет порядка 10–30% от суммы главных аллотигенных компонентов, полевых шпатов (преимущественно

но средних и кислых плагиоклазов) – 25–35%, обломков пород – до 70%. Среди последних преобладают кислые, основные и средние вулканыты, намного реже встречаются интрузивные разности (гранодиориты, диориты), а также серпентиниты и полностью хлоритизированные обломки вулканического стекла (?). Обломки метаморфических и осадочных пород составляют не более 15–20% от общего количества литокластов. Как правило, это кварциты и микрокварциты, встречаются также слюдяные сланцы и аргиллиты; количество обломков кремней варьирует от 5 до 10%. Цемент в песчаниках хлоритовый или кальцитовый. Рассматриваемые породы в значительной степени похожи на псаммиты западного типа разреза зилаирской серии Южного Урала, сформировавшиеся за счет размыва микроконтинента Уралтау (Мизенс, 2000а, б, 2002; Мельничук, Фазлиахметов, 2017). В составе глинистых пород кодинской и устькодинской свит преобладают гидрослюды и смешанослойные образования ряда гидрослюда–сметит (Мельничук, 2017; Мельничук, Рянская, 2017). Количество Fe-Mg хлорита составляет 10–30%, редко встречается каолинит (до 2%). Алевритовая примесь (25–45%) представлена кварцем и кислым плагиоклазом. Считается, что накопление рассматриваемых отложений происходило в результате размыва одного источника сноса (Мельничук, Рянская, 2017; Мельничук, 2017). Перед поднятием на поверхность отложения претерпели глубинный катагенез (Мельничук и др., 2018).

Сортимская свита (мощность до 1400 м) в пределах Большехетской впадины (Уренгойский структурный район) представляет собой чередование аргиллитоподобных глин и песчаников с преобладанием тех или иных литотипов в отдельных пачках. Песчаные породы свиты, речь о которых идет в настоящей работе, имеют валанжинский возраст и являются граувакковыми аркозами с содержанием зерен кварца (нередко регенерированных) от 25 до 40%, полевых шпатов (кислые плагиоклазы и калиевые полевые шпаты) – 45–60%, обломков пород – 10–20%. Последние, в основном, представлены эффузивами кислого состава, в подчиненном количестве присутствуют метаморфические породы – микрокварциты и кристаллические сланцы, изредка встречаются обломки основных/средних эффузивов, кремни, пертитовые и мирмекитовые сростки. Поступление терригенного материала в Большехетскую впадину при формировании сортимской свиты происходило с северо-востока из Енисей-Хатангского прогиба и с востока – с Сибирской платформы (Титов, 2012). Цементом в песчаниках являются цеолиты, хлорит, кальцит и гидрослюды. Песчаники претерпели преобразования, характерные для глубинного катагенеза (Титов и др., 2019).

¹ С учетом данных (Willner et al., 2001) для верхневендских отложений в целом среди песчаников данного уровня ашинской серии присутствуют также полевошпато-кварцевые граувакки и мезомиктовые разности псаммитов.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ПЕСЧАНИКОВ

Традиционно в российской и зарубежной литературе изучение минералогического состава песчаников в шлифах в целях их классификации и/или реконструкции состава пород в источниках сноса представляет собой точечный подсчет (point counting) необходимого количества зерен вдоль нанесенных на покровное стекло параллельных линий с последующим отнесением распознанных обломков/зерен/кристаллов к определенной категории/группе в соответствии с принятой исследователем классификацией. Линии наносятся перпендикулярно слоистости через одинаковое расстояние, несколько превышающее максимальный размер обломков (Van der Plas, Tobî, 1965), либо равное среднему размеру зерен (Шванов, 1987). Необходимым при подсчете является такое количество точек/обломков/зерен/кристаллов, при котором ошибки, совершаемые исследователем, не будут существенно влиять на конечный результат. Как правило, это количество составляет от 300 (минимум, см. (Van der Plas, Tobî, 1965)) до 600 на шлиф. Матрикс и цемент при описанном подходе не учитываются.

С середины 1970-х до начала 1980-х гг. в публикациях зарубежных авторов для подобных целей используются два метода подсчета состава песчаников – классический (или наиболее близкий к нему “индианский”²) метод (Ingersoll et al., 1984; Weltje, 2002)) и метод Гацци–Дикинсона, разработанные независимо друг от друга П. Гацци (Gazzi, 1966) и В.Р. Дикинсоном (Dickinson, 1970). Результаты, получаемые при применении указанных подходов, различны. Во всех деталях их сравнение приведено в работах Ж.Г. Зуффа (Zuffa, 1980, 1985), Р.В. Ингерсолла с соавторами (Ingersoll et al., 1984) и в дискуссии, развернувшейся после их публикации (см., например, (Weltje, 2002) и др.). В нашей статье мы охарактеризуем только главные особенности и различия методов, а также то, как в их рамках исследователи пытались справиться с вариацией минерального состава песчаников, возникающей в результате изменения размерности зерен (Allen, 1962).

При использовании классического подхода исследователь отдельно считает зерна кварца, полевых шпатов и обломков пород. Под последними в данном случае понимаются зерна, состоящие из двух и более фаз или кристаллов. При этом ни одна из фаз не занимает более 90% площади такого зерна (это требование особенности важно для зерен

тонко- и мелкопесчаной размерности) и/или размер обозначенных фаз/кристаллов больше 0.0625 мм (актуально для средне- и крупнопесчаных зерен). В противном случае такие зерна следует относить к другой категории, за исключением поликристаллических кварцевых разностей (микрокварциты, кварциты, кремни, некоторые кислые эффузивы(?)). Следует отметить, что: 1) обломки карбонатных пород не учитываются при данном подходе; 2) рекомендуется исследовать только одну определенную фракцию песчаников, например, 0.20–0.35 мм (подробнее см. (Шванов, 1987)); это позволяет так или иначе нивелировать эффект изменения минерального состава, в том числе при сравнении песчаников разных объектов; 3) метод был разработан в первую очередь для того, чтобы оценить степень изменений состава песчаной фракции в результате выветривания и транспортировки (Weltje, 2002). Классический метод практически повсеместно используется отечественными исследователями (см. следующий раздел) и авторы настоящей публикации не являются исключением.

Метод Гацци–Дикинсона нацелен на минимизацию эффекта изменения минерального состава за счет своеобразного разбиения обломков пород при подсчетах. Так, мономинеральные кристаллы/зерна, имеющие песчаную размерность и являющиеся составной частью более крупного обломка, считаются отдельно, в связи с чем такая категория обломков, как плутонические породы, при использовании этого метода отсутствует, так как при подсчете при попадании в перекрестие окуляра они будут просто кварцем, полевыми шпатами либо чем-то иным. Другие обломки пород, вмещающие кристаллы песчаной размерности, должны быть отнесены к обломкам пород либо к какой-то иной категории в зависимости от того, что попадает в перекрестие окуляра. Соответственно, крупные литокласты вулканических пород в составе еще более крупных обломков осадочных пород (например, песчаников) должны быть учтены в соответствующей категории. Зерна, являющиеся включениями либо частью более крупных обломков и имеющие размерность менее 0.0625 мм, не считаются отдельно. Обломки карбонатных пород при подсчетах по методу Гацци–Дикинсона так же, как и ранее, не учитываются.

Применение метода Гацци–Дикинсона приводит к смещению фигуративных точек более грубых песчаников на треугольных диаграммах, например F–Q–L или F–Q_m–L_t (см. далее), ближе к стороне “кварц–полевые шпаты”. Для тонкозернистых разностей и кварцевых либо полевошпат-кварцевых песчаных пород изменения не столь значительны (Ingersoll et al., 1984). Отмечается также, что данный метод более удобен для подсчета состава песчаников по сравнению с классическим или “индианским”, в особенности для плохо сортированных

² Индианская школа обязана своим названием работам профессора Л.Дж. Саттнера (например, (Suttner, 1974)) из исследовательского Индианского университета, расположенного в г. Блумингтон, штат Индиана.

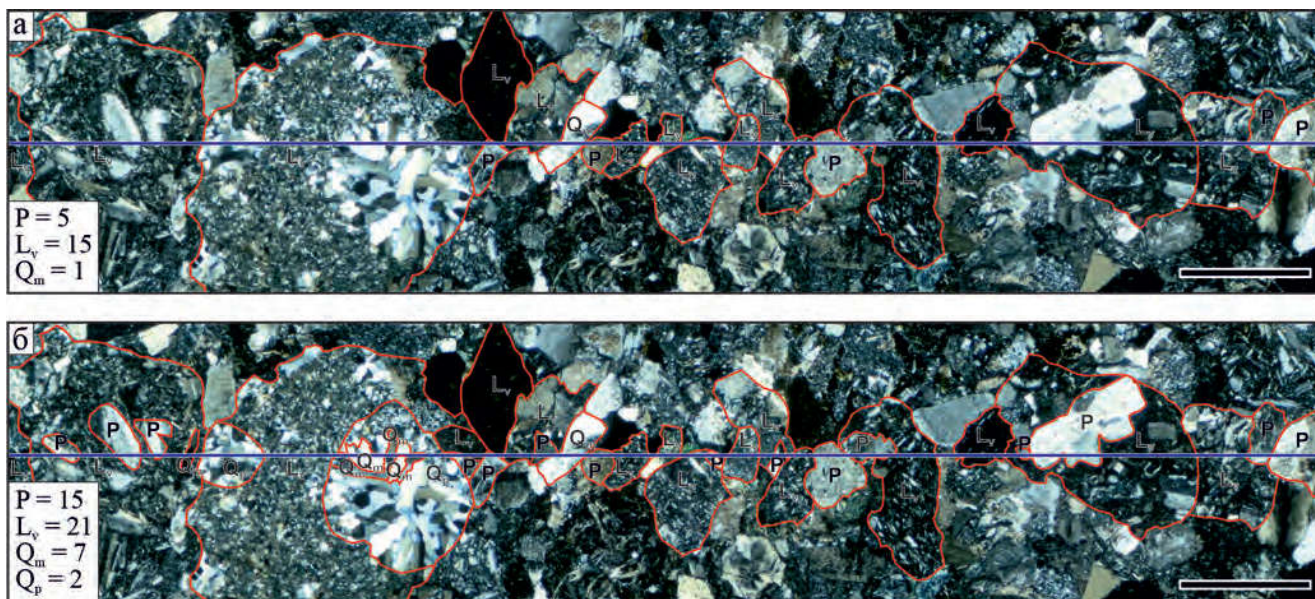


Рис. 2. Пример количественного подсчета состава песчаника классическим методом (а) и методом Гацци–Дикинсона (б).

Q_m – зерна монокристаллического кварца; Q_p – то же, поликристаллического кварца; P – обломки плагиоклазов; L_v – то же, вулканических пород. Красными контурами показаны обломки/зерна/кристаллы, которые удовлетворяют двум условиям – их пересекает подсчетная линия (синего цвета) и они учитываются при исследовании. В качестве примера использован образец верхнедевонских песчаников кодинской свиты (полевошпатовые граувакки). Длина масштабной линейки 1 мм.

Fig. 2. Example of the sandstone quantitative composition estimation by the using of classical (or Indiana) method (a) and Gazzi–Dickinson method (b).

Q_m – monocrystalline quartz; Q_p – polycrystalline quartz; P – plagioclase feldspar; L_v – volcanic lithics. Some fragments/grains/crystals have red contour cause they are fulfil two conditions – crossed by the blue counting line and count towards the method. We used the Upper Devonian Kodinka Formation sandstone (feldspathic graywacke) as test item. Scale leght 1 mm.

грубых разностей (Ingersoll et al., 1984). На рис. 2 показан пример подсчета зерен разных типов обоими методами в песчаниках кодинской свиты.

Наличие в песчаных породах карбонатных обломков учитывается в модификации метода Гацци–Дикинсона, предложенной Ж.Г. Зуффа (Zuffa, 1980, 1985) (метод Гацци–Зуффа, согласно (Weltje, 2002)). Обломки пород при этом подразделяются на 4 типа – карбонатные (в том числе фоссилии) и силикластические, имеющие вне- и внутрибассейновое происхождение. Данный метод наиболее актуален для песчаников смешанного (карбонатно-силикластического либо силикластически-карбонатного) состава (hybrid sandstones).

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ДИАГРАММЫ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕКОНСТРУКЦИИ СОСТАВА ПОРОД В ОБЛАСТЯХ СНОСА

Г. Мильнер (1968, с. 433–443) считает, что “Исследование любых отложений с геологической точки зрения нельзя считать полным, если помимо изучения качественного состава и количественных соотношений компонентов в породе не проведено определение *источников сноса* и их влияние на па-

леогеографию областей осадконакопления. Без такого исследования любая петрографическая работа теряет точность и практическую ценность. ... Определяя источник сноса, нужно изучать не только тяжелые минералы, но и более крупные компоненты пород, такие как валуны, гальки и другие крупные обломки. ... Присутствие или отсутствие в осадках породообразующих минералов находится в прямой зависимости от их химической и физической устойчивости ...”.

Как отмечено В.Д. Шутовым (Граувакки, 1972, с. 9), классификация терригенных пород “...должна способствовать общей генетической типизации терригенного вещества и отразить максимальное количество генетических признаков с тем, чтобы с их помощью выяснять пути формирования ... отложений”. Наибольший эффект при этом может быть получен при использовании основного классификационного треугольника (“кварц–полевые шпаты–обломки пород”) в сочетании с дополнительными/дочерними треугольниками для полевых шпатов и обломков пород (рис. 3, 4). Указанные диаграммы “...несут информацию, необходимую для классификационного разделения песчаников и выяснения основных условий их формирования... ..”.

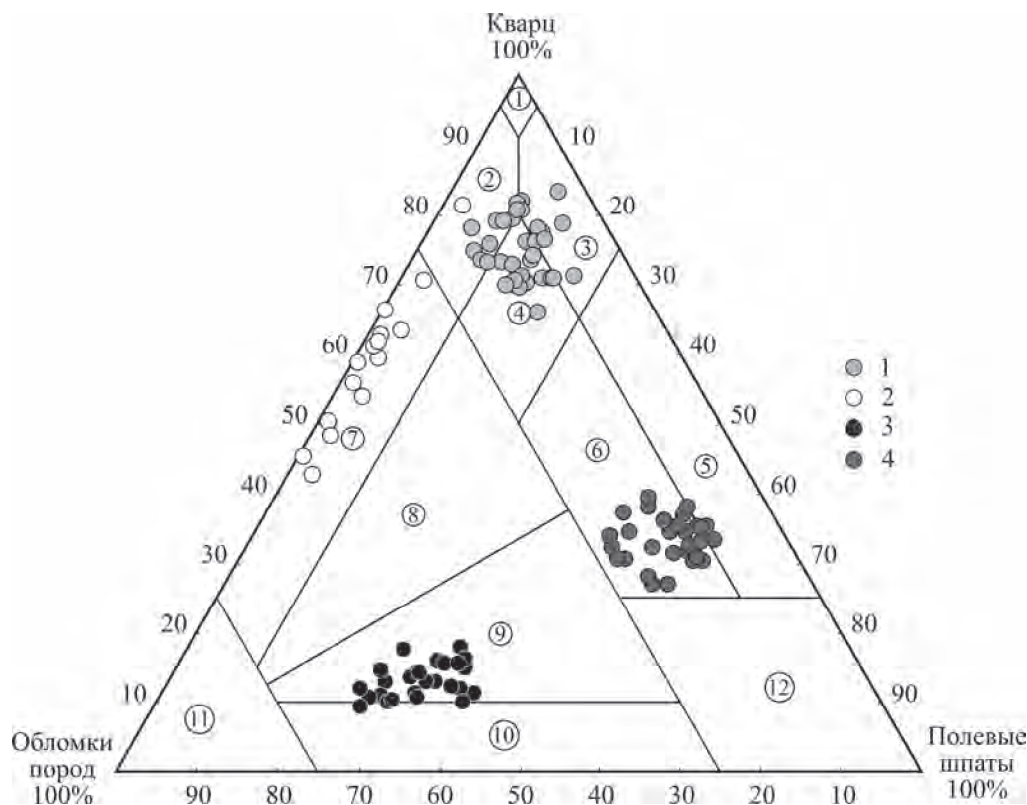


Рис. 3. Классификационная диаграмма “кварц–полевые шпаты–обломки пород” (Шутов, 1967; Граувакки, 1972) с нанесенными на нее фигуративными точками песчаников.

1 – бирьянская подсвита зильмердакской свиты верхнего рифея, 2 – басинская свита верхнего венда Южного Урала, 3 – кодинская и устькодинская свиты верхнего девона Среднего Урала, 4 – верхняя (валанжинская) часть сортымской свиты нижнего мела Большехехетской впадины Западно-Сибирский осадочного мегабассейна. Классификационные поля песчаников (цифры в кружках): 1 – мономиктовые кварцевые; 2 – кремнекласитито-кварцевые; 3 – полевошпат-кварцевые; 4 – мезомиктовые; 5 – собственно аркозовые; 6 – граувакково-аркозовые; 7 – кварцевые граувакки; 8 – полевошпат-кварцевые граувакки; 9 – кварц-полевошпатовые граувакки; 10 – полевошпатовые граувакки; 11 – собственно граувакки; 12 – поле песчаников не чисто терригенного происхождения (кристаллотуфы).

Fig. 3. Classification diagram “quartz–feldspars–rock fragments” (Shutov, 1967; Grauvakki, 1972) with the data points of the sandstones.

1 – the Bir’yan sub-formation of the Zilmerdak Formation, Upper Riphean, 2 – the Upper Vendian Basa Formation the Southern Urals, 3 – the Upper Devonian Kodinka and Ust’kodinka formations of the Middle Urals, 4 – the upper (Valanginian) part of the Sortym Formation, the Lower Cretaceous of the Bolshekhetskaya Depression, West-Siberian sedimentary megabasin. Sandstone classification fields (number in cercles): 1 – monomictic quartz; 2 – siliciclastic-quartz; 3 – feldspar-quartz; 4 – mesomycitic; 5 – arkose proper; 6 – greywacke-arkose; 7 – quartz greywackes; 8 – feldspar-quartz greywackes; 9 – quartz-feldspar greywackes; 10 – feldspar greywackes; 11 – greywacke proper; 12 – the field of sandstones are not of purely terrigenous origin (crystallo-tuffs).

только минералогические поля, образуемые набором фигуративных точек, являются тем элементом, который несет достаточную информацию о генетических условиях образования породы”. Положение полей состава песков/песчаников на диаграмме “кварц–полевые шпаты–обломки пород” вместе с данными, полученными при анализе дочерних треугольников, дают более или менее точные сведения о характере размывавшихся пород в области сноса. Смещение материала, поступающего в область седиментации из различных источников сноса, также отражается на основном и дочерних треугольниках.

Значительную площадь на основной диаграмме занимают поля фигуративных точек песков/песчаников, возникших за счет разрушения *эффузивных пород*. Они расходятся от вершины “обломки пород” к центру треугольника и в сторону двух других вершин. Считается, что такая ориентировка полей связана с тонкозернистым характером материнских пород, ведущим при разрушении к освобождению зерен кварца и полевого шпата в первичном соотношении. Вдоль стороны “обломки пород–кварц” концентрируются поля песчаников, образованные преимущественно в результате разрушения кислых эффузивов и яшмовидных пород.

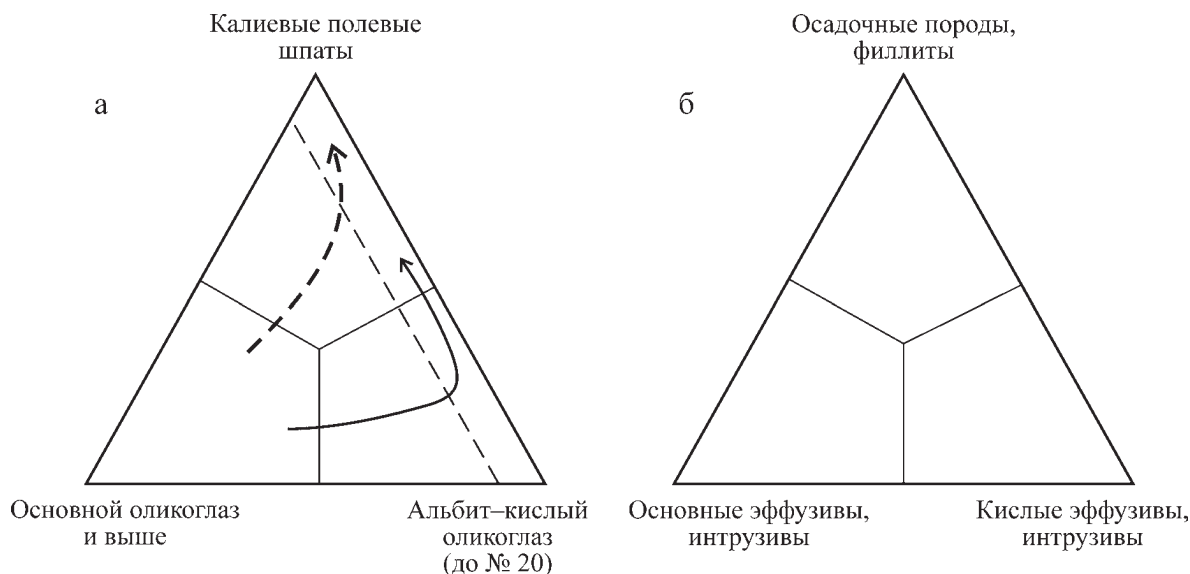


Рис. 4. Дочерние к диаграмме на рис. 3 треугольники, детализирующие состав ее вершин (а – полевых шпатов, б – обломков пород).

Стрелки на части “а” показывают главное (сплошная линия) и второстепенное (прерывистая линия) направления минералогического созревания ассоциации полевых шпатов.

Fig. 4. Affiliated triangles to the Fig. 3 diagram detailing the composition of its vertices (a – feldspar, б – rock fragments).

The arrows on the part “a” show the main (solid line) and secondary (dashed line) directions of the mineralogical maturation of the feldspar association.

Примерно такое же положение на основной диаграмме занимают поля песков/песчаников, образованных в результате разрушения *терригенных отложений* складчатых областей, так как источниками кластики для них выступали полимиктовые толщи, в составе которых значительную роль играли и эффузивно-осадочные образования. Поля фигуративных точек песков/песчаников, образованных в результате разрушения собственно *вулканогенно-обломочных пород*, преимущественно располагаются вдоль основания диаграммы “кварц–полевые шпаты–обломки пород”.

Состав полевых шпатов отражает как исходный состав материнских пород (начальные этапы формирования главным образом полимиктовых песчаных пород), так и процессы “созревания” минерального состава песков/песчаников при неоднократном переотложении кластики: калиевые полевые шпаты (наиболее химически устойчивые) → кислые плагиоклазы, до № 20 → основные плагиоклазы, выше № 20 (наименее стойкие). Присутствие в песчаниках основных плагиоклазов указывает на петрогенный характер пород, такие песчаники возникают преимущественно в результате разрушения средних и основных изверженных пород. Песчаники с преобладанием калиевых полевых шпатов образованы, как правило, за счет разрушения *полнокристаллических* кислых, средних и щелочных изверженных по-

род/гранитоидов, а также метаморфических пород высоких степеней метаморфизма. Пески и песчаники, в составе которых преобладают кислые плагиоклазы, – результат эрозии вторично измененных изверженных и метаморфических пород.

Анализ обломков пород, уточняющих тип материнских образований, имеет большое значение главным образом для песчаников, формировавшихся в процессе непосредственного разрушения изверженных и метаморфических образований (т.е. пород первого седиментационного цикла/петрогенных/пород граувакковой группы). Ввиду существенного многообразия пород различных питающих провинций “...приходится концентрировать внимание на обломках, принадлежащих к трем основным генетическим группам: осадочным, кислым и основным изверженным и метаморфическим породам. ... Более детальное определение обломков пород связано иногда со значительными трудностями и содержит элемент субъективизма...” (Граувакки, 1972, с. 12–13).

Ф.Дж. Петтиджоном (1981, с. 605–611) подчеркнуто, что ответ на вопрос о составе пород в питающих провинциях “...дает главным образом изучение состава гравелитовых обломков и песчаников, которое непосредственно указывает на тип пород источников сноса. Однако состав осадков отличается от состава исходных пород в области сноса,

поскольку обломочный материал [того или иного]³ района был просеян через “геологическое сито” и претерпел существенные изменения в результате селективной утери одних компонентов и обогащения другими..., абразии при транспортировке, а также изменения или растворения на стадии диагнеза... [Состав кластических осадков] зависит отчасти от состава материнских пород, а отчасти – от их зрелости, которая является показателем степени осуществления процессов химического выветривания в направлении их полного завершения. ...Задача петролога сводится к тому, чтобы, исследовав конечный фракционированный [осадок], определить, откуда он привнесен (расстояние и направление транспортировки), установить тип породы или пород, из которых он образовался... Каждому типу материнской породы, как правило, соответствует свой особый набор минералов, который является “ключом” к определению характера этой породы. Однако состав осадка [контролируется] не только характером материнской породы; он является также функцией климата и рельефа области сноса ..., которые определяют зрелость [осадков] ... состав продуктов выветривания и образующихся в конечном итоге осадков является результатом чаще всего комбинированного влияния рельефа и климата на исходные породы; любые выводы, касающиеся этих факторов или типа материнской породы, должны основываться на химическом и минералогическом составе осадков. ... В среднем песчаники, по оценке Крынина..., на 30% состоят из переработанного материала, на 25% – из нового материала вулканического происхождения и на 45% – из материала метаморфических источников сноса...

...Одним из наиболее информативных ... компонентов [песчаников] являются обломки пород; их тщательное изучение должно быть неотъемлемой частью исследований по определению питающих провинций. ... [Обломки] пород несут больше информации об источниках сноса, чем какие-либо другие типы зерен, хотя в некоторых случаях их бывает трудно идентифицировать...

...Многие неясные вопросы могут быть решены, если в разрезе присутствуют конгломераты. ... Определенные типы гальки и их соотношения указывают как на тип материнской породы, так и на дальность транспортировки; менее устойчивые обломки по мере увеличения этого расстояния быстро разрушаются. Однако, поскольку различные материнские породы обладают разной способностью к образованию обломков и неодинаковой устойчивостью к абразии, соотношения, наблюдаемые в галечниках, нельзя рассматривать как прямое отражение относительного содержания определенных пород в области сноса...

³ Здесь и далее в квадратных скобках дана наша редакция оригинального авторского текста.

...Для определения источников сноса используются также легкие и тяжелые минералы... [Последние оказались] исключительно важным средством определения характера материнской породы ... Как и в случае с компонентами галечников, состав ... тяжелых минералов может изменяться не только за счет потери менее стабильных минералов в процессе выветривания, но и в результате селективных потерь как при абразии в процессе транспортировки, так и вследствие растворения уже после осадконакопления...

[Некоторое значение] для изучения питающих провинций могут иметь ... глинистые минералы. ...Однако глинистые минералы подвержены изменениям после отложения и захоронения, поэтому ... менее пригодны для изучения источников сноса, чем обломочные компоненты песков или галька в галечниках” (Петтиджон, 1981)⁴.

По мнению В.Н. Шванова (1987), состав песка (как минеральный, так и химический) только на самых ранних этапах образования (и во всех климатических зонах) близок к составу материнской породы. Хотя уже на палеоводосборах (в корях выветривания) и при переносе песчаной кластики она заметно обогащается кварцем. Параллельно наблюдается быстрая дифференциация компонентов песков по химической устойчивости и механической прочности, что ведет к невозможности использовать для реконструкции состав материнских пород соотношения компонентов с разными абразивными и химическими свойствами. В самом общем виде можно выделить четыре группы песчаников (породы начальной, умеренной, значительной и глубокой дифференциации), достоверность реконструкций состава размывавшихся в источниках сноса образований для которых заметно различаются. Для песчаников первой группы могут быть установлены почти все породы питающей провинции; наибольшее значение при этом имеет диагностика состава плагиоклазов, присутствие санидина, микроклина, пертитов, разнообразных эффузивов и других обломков). Песчаники второй группы, по представлениям В.Н. Шванова, лишены существенной части информации о составе материнских пород.

⁴ Мы понимаем, что этот абзац может показаться читателю не совсем относящимся к тематике настоящей работы, однако так как в следующих статьях нашего обзора речь идет и о глинистых породах, то следует отметить, что, несмотря на скептическое отношение Ф.Дж. Петтиджона (1981) к глинистым минералам как к источникам данных о составе пород в источниках сноса, такая информация широко используется при исследовании современных донных осадков морей и океанов (Griffin et al., 1968; Курносов, Мурдмаа, 1978; Ehrmann et al., 1992; Левитан и др., 1995, 2003, 2007; Nürnberg et al., 1995; Petschick et al., 1996; Rossak et al., 1999; Wahsner et al., 1999; Winkler et al., 2002; Патеев и др., 2008; Krylov et al., 2008; Vogt, Knies, 2008, 2009; и др.).

Состав обломков в песчаниках третьей группы позволяет судить о размывавшихся на палеоводосборах породах весьма приблизительно. Наконец, песчаники глубокой степени дифференциации не позволяют сделать сколько-нибудь обоснованные выводы о составе пород питающих провинций.

В опубликованной в 1987 г. монографии В.Н. Шванов приводит несколько модифицированную диаграмму В.Д. Шутова, на которой выделено семь полей, соответствующих основным петрографическим видам песчаников (рис. 5). Поле граувакк отвечает породам, полученным в результате разрушения различных горных пород при слабом химическом выветривании и недалеком переносе. Поле аркозов также отвечает продуктам физического выветривания, претерпевшим слабый перенос, но

полученным при разрушения интрузивных, эффузивных и метаморфических пород преимущественно кислого состава. По мере выветривания и переноса пески, образованные за счет разрушения гранитов и родственных им пород, обогащаются кварцем, в результате их фигуративные точки на диаграмме “кварц–полевые шпаты–обломки пород” смещаются вверх вдоль стороны “полевые шпаты–кварц”. Полевошпатовые песчаники формируются, по всей видимости, за счет локального размыва средних и щелочных магматических пород, а также вследствие перемива кристаллокластики. Полевошпатовые граувакки можно рассматривать как недифференцированные или незначительно перетолженные продукты эрозии средних и основных эффузивов или же считать результатом смешения

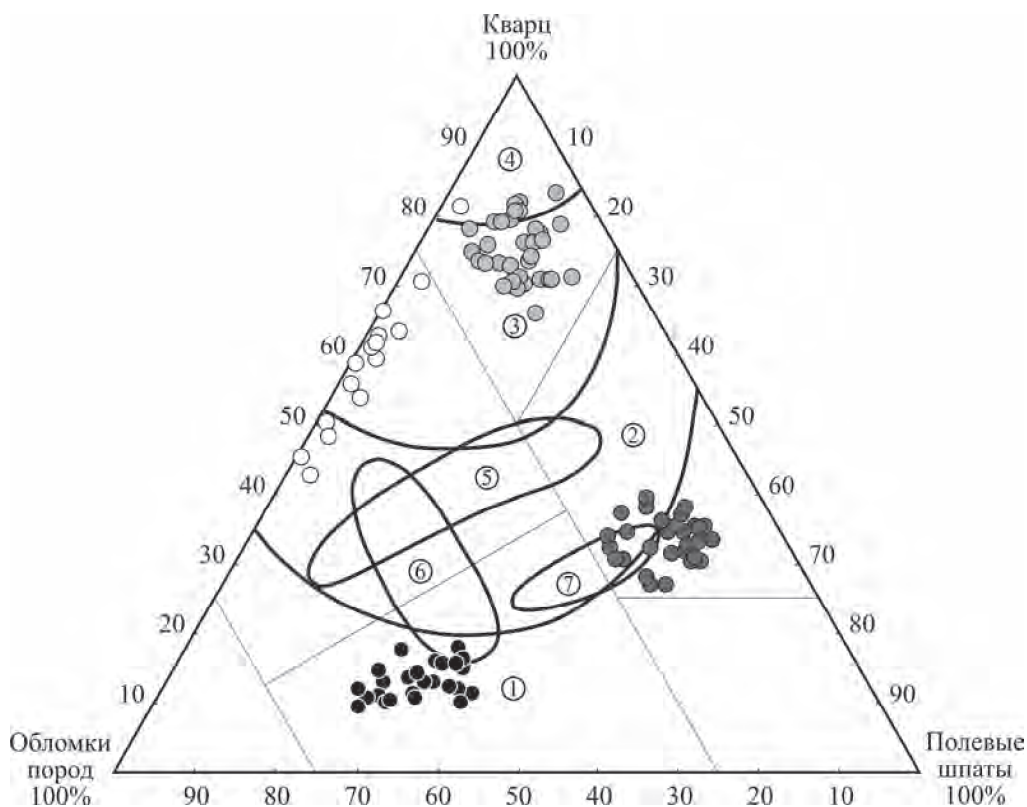


Рис. 5. Диаграмма “кварц–полевые шпаты–обломки пород” В.Н. Шванова (1987) с нанесенными на нее фигуративными точками тех же песчаников, что и на рис. 3.

Поля песчаников: 1 – отражающих составы материнских пород; 2 – селективно отражающих составы материнских пород; 3 – отражающих составы пород в обломочном кварце; 4 – не содержащих сведений о составе материнских пород; 5 – песчаники, получающиеся в результате смешения материала осадочных пород и гранитов; 6 – то же, в результате смешения полимиктового и петрокластического материала/продукты эрозии изверженных пород; 7 – песчаники – продукты смешения петрокластического материала из изверженных пород.

Fig. 5. “Quartz–feldspar–rock fragments” diagram by V.N. Shvanov (1987) with the data points of the sandstones the same as on Fig. 3.

Fields of sandstones: 1 – reflecting compositions of parent rocks; 2 – selectively reflecting compositions of parent rocks; 3 – reflecting rock compositions in detrital quartz; 4 – not containing information on the composition of parent rocks; 5 – sandstones resulting from the mixing of sedimentary material and granites; 6 – the same, as a result of mixing polymict and petroclastic material/products of erosion of igneous rocks; 7 – sandstones, which are products of mixing of petroclastic material from igneous rocks.

ния продуктов разрушения магматических и осадочных образований с низким содержанием кварца. Кварцевые граувакки, по мнению В.Н. Шванова, – это продукты дальнейшей дифференциации граувакк, ведущей к росту в них доли кварца или кварца и полевых шпатов, а также результат непосредственного размыва кислых эффузивов, осадочных и метаморфических пород. Мезомиктовые, олигомиктовые и кварцевые пески/песчаники являются породами, образованными за счет размыва разнообразных питающих провинций, и прошедшими нескольких осадочных циклов, сопровождавшихся глубоким химическим выветриванием и, очень часто, длительной механической абразией. Перечисленные петрографические виды песчаных пород образуют семейства граувакковых песчаников (собственно граувакки, кварцевые и полевошпатовые граувакки), аркозов (собственно аркозы и полевошпатовые песчаники), олигомиктово-кварцевых (олигомиктовые и кварцевые породы) и мезомиктовых пород.

При детальном литологическом исследовании петрографические семейства/виды могут дополняться выделением подчиненных классификационных единиц – тех или иных разновидностей песчаников по качественному составу и количественному соотношению в них в основном обломков пород и полевых шпатов. Так, для семейства граувакк по составу обломочных зерен пород могут быть выделены петрокластические, кремневые, лититовые и полимиктовые разновидности. Семейство аркозов по составу полевых шпатов делится на К-, К-Na-, Na-K- и Na-Ca- разновидности (Шванов, 1987).

Особо, хотя и предельно кратко, хотелось бы остановиться на диагностике обломков пород в шлифах, используя для этого приведенную в работе (Шванов, 1987) информацию. Основным путем определения обломков пород при этом – “узнавание” (термин В.Н. Шванова) по ряду косвенных признаков. Так, обломки кварцитов и микрокварцитов в скрещенных николях поликристаллически и обладают различной внутренней структурой (конформной, гранобластовой, тонко- и микрокристаллической/микрогранобластовой/микрокварцитово- и др.). Кремнистые обломки в скрещенных николях изотропны, или содержат фенокристы, розетки и волокнистые агрегаты халцедона, а также прожилки тонкокристаллического кварца или халцедона. Углеродистые фтаниты обладают тонкоагрегатным строением (халцедон-опаловая масса) и пропитаны непрозрачным или полупрозрачным органическим веществом. Глинистые фтаниты и кремнистые аргиллиты в скрещенных николях демонстрируют присутствие на фоне изотропной опаловой, халцедон-опаловой или микрокристаллической основной ткани гидрослюдисто-хлоритового материала, часто имеющего одинаковую ориентировку. Обломки данного типа нередко выполняют

в песчаниках роль конформного заполнителя. Обломки глинистых пород разной степени постседиментационного изменения сложены чешуйками глинистых минералов с двупреломлением в желтых тонах. Правильная диагностика обломков этого типа более вероятна в случае присутствия в них примеси обломочных зерен алевритовой или кварцевой размерности. Обломки глинистых пород часто сдавлены, изогнуты или раздроблены более твердыми зернами. Обломки алевритов и песчаников хорошо диагностируются по соответствующим структурам. Обломки карбонатных пород обычно легко узнаются по характерным перламутровым цветам интерференционной окраски. Однако требуются специальные навыки для отделения их от карбонатного цемента. Обломки кристаллических (магматических и метаморфических) пород достаточно легко диагностируются в скрещенных николях по характерным минеральным ассоциациям и структурам. Обломки эффузивных пород хорошо узнаются в случае присутствия в них порфировых вкрапленников различной формы, а также лейст плагиоклазов. В монографии В.Н. Шванова (1987) можно найти также краткую характеристику обломков кислых (альбитофиров, микрофельзитов/фельзитов) и основных (порфиринов, спилитов, диабазов) эффузивов.

Важно иметь в виду, что обломки пород разного состава обладают различной устойчивостью к переносу и химическому воздействию. По степени устойчивости на путях транзита может быть намечен следующий условный ряд: глинистые обломки (встречаются только вблизи областей размыва) → эффузивные → песчаные → карбонатные → кристаллических пород → кремнистые → кварцитовые обломки (как правило, переносятся на большие расстояния и/или проходят более одного седиментационного цикла). Постседиментационные изменения также ведут к исчезновению некоторых типов обломков пород в песчаниках. Ряд устойчивости в этом случае имеет вид: обломки глинистых пород → карбонатных (разрушаются в зоне начального/умеренного катагенеза) → эффузивных → песчаных → кристаллических пород (разрушаются при глубоком катагенезе). Кремнистые породы и кварциты не разрушаются и при метагенезе.

РЕКОНСТРУКЦИИ СОСТАВА ПЕТРОФОНДА ПО ДАННЫМ О КОЛИЧЕСТВЕННОМ СООТНОШЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ КАРКАСА ПЕСЧАНИКОВ

В середине 1970-х–начале 1980-х гг. и несколько позднее был предложен ряд треугольных диаграмм ($P-Q_m-K$, $L_s-L_v-L_m$, $L_v-Q_p-L_s$, $F-Q-L$, $F-Q_m-L_t$ и др.)⁵ для реконструкции состава питающих

⁵ Здесь Q – общее количество зерен кварца; Q_m – зерна

провинций по данным о количественном соотношении различных компонентов каркаса песчаников (Dickinson, Suczek, 1979; Dickinson et al., 1983; Dickinson, 1985; Ingersoll, 1990; Weltje, 1994; Garzanti et al., 2004, 2007; и др.). В настоящее время они достаточно часто используются при исследовании песчаников разного возраста как зарубежными, так и отечественными специалистами (Тучкова, 1996, 2007; Anani, 1999; Arribas et al., 2003; Calvo, 2003; von Eynatten, 2003; Marsaglia, 2004; Yuste et al., 2004; Zhang et al., 2006; González-Acebrón et al., 2007; Akarish, El-Gohary, 2008; Allen, Johnson, 2010; Хисамутдинова и др., 2016; Маслов и др., 2016а; и др.).

На диаграммах В. Дикинсона с соавторами (Dickinson, Suczek, 1979; Dickinson, 1985, 1995) типизация источников сноса приведена в достаточно общем виде. В качестве наиболее крупных питающих провинций в них выделяются магматические дуги, континентальные блоки и рециклированные орогены (рис. 6). Магматические дуги поставляют в осадок вулканокластический материал, формирующийся как непосредственно вследствие вулканической деятельности, так и являющийся результатом эрозии вулканических построек. При далеко зашедших процессах разрушения дуг на дневную поверхность могут быть выведены их “корневые зоны”, представленные полнокристаллическими магматическими породами. Они являются источниками кварц-полевошпатовой кластики, практически неотличимой от аркозового материала, образующегося в результате размыва поднятий фундамента. Смещение материала из вулканических и плутонических источников ведет к появлению широкого спектра “вулcano-плутонических” песков (Dickinson, 1982). Несмотря на заметные вариации состава последних, для них характерны постоянно высокие величины отношения L_v/L_t и низкое или умеренное количество зерен кварца. Песчаники, присутствующие в разрезах субдукционных комплексов, сложены преимущественно вулканоплутоническим материалом, однако с ними могут ассоциировать кварцевые песчаники – продукты размыва континентальных блоков, попавшие в зоны субдукции вместе с осадочным материалом на пододвигающейся плите (Velbel, 1980; Dickinson, 1982; и др.).

монокристаллического кварца; Q_p – поликристаллический кварц (обломки кварцитов, микрокварцитов и кремней); L – все обломки пород, кроме “кварцевых”; L_t – общее количество литокластов; L_{vh} (или L_v) – обломки вулканических/гипабиссальных пород; L_s – зерна/обломки осадочных пород; L_m – зерна/обломки метаморфических пород; P – зерна плагиоклазов; K – зерна калиевых полевых шпатов; F – общее число зерен полевых шпатов. При построении диаграмм используются результаты подсчета количества зерен и обломков, полученные с использованием метода Гацци–Дикинсона.

Размыв поднятий фундамента, часто ограниченных тектоническими нарушениями и ассоциирующихся с рифтовыми и трансформными структурами, продуцирует преимущественно аркозовые пески. Сходный по составу материал может формироваться за счет выведенных на дневную поверхность древних блоков в форландовых бассейнах, а также разрушения плутонов в “корнях” магматических дуг. Это бедные лититовыми обломками кварц-полевошпатовые пески и песчаники, напоминающие аркозовые пески, источниками которых выступают поднятия фундамента. В случаях, когда процессы эрозии не были способны полностью уничтожить перекрывающий фундамент осадочный чехол, могут формироваться пески и песчаники, близкие по составу к продуктам разрушения пород магматических дуг или рециклированных орогенов (Mack, 1984; Dickinson, 1985).

Источниками обломочного материала в орогенных областях, по представлениям В. Дикинсона с соавторами, являются вулcano-плутонические ассоциации океанических и континентальных дуг (“магматические дуги”), преимущественно осадочные или метаморфические образования выведенных на уровень размыва “субдукционных комплексов”, складчато-надвиговые пояса “форландовых поднятий” и собственно “коллизийные орогены”. При разрушении каждой из перечисленных ассоциаций формируются осадочные последовательности с достаточно специфическими особенностями. Так, считается, что вследствие эрозии пород “субдукционного комплекса” в составе песчаников преобладают обломки кремнистых пород; песчаники, образованные за счет размыва “форландовых поднятий”, содержат существенную долю лититовых фрагментов, количество кварца в них относительно высокое, полевых шпатов и обломков пород – небольшое. Осадки, образованные вследствие эрозии “коллизийных орогенов”, характеризуются тем же содержанием кварца, высоким отношением кварц/полевые шпаты и содержат многочисленные фрагменты осадочных и метасадочных пород.

В то же время, по мнению (Garzanti et al., 2007), какие-либо четкие критерии разграничения различных типов орогенных областей сноса в работах В. Дикинсона с соавторами отсутствуют. Более того, при сравнении их с современными обстановками, где все влияющие на процессы осадконакопления факторы могут быть в достаточной степени идентифицированы, обнаруживаются некоторые противоречия с моделью В. Дикинсона. В указанной выше публикации предложена несколько иная типизация орогенных областей как источников сноса. Она основана на представлениях о том, что тектонические ансамбли орогенов являются результатом взаимодействия ограниченно-го числа различных геологических областей/доме-

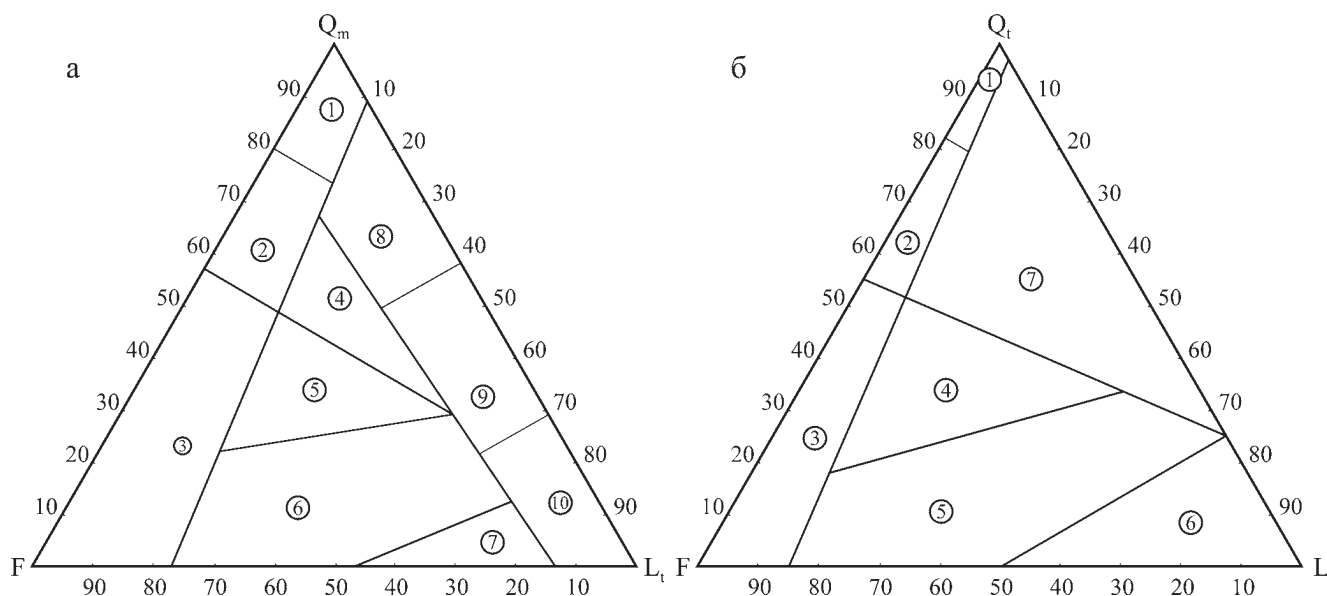


Рис. 6. Диаграммы F–Q_m–L_t (а) и F–Q_t–L (б) В. Дикинсона с соавторами (Dickinson et al., 1983).

а. Источники обломочного материала: 1 – внутренние области кратона; 2 – переходные континентальные области; 3 – поднятия фундамента; 4 – смешанные области; 5 – эродированные дуги; 6 – переходные островодужные обстановки; 7 – неэродированные дуги; 8 – рециклированные кварцосодержащие комплексы; 9 – переходные рециклированные области; 10 – рециклированные лититовые комплексы.

б. Источники обломочного материала: 1 – внутренние области кратона; 2 – переходные континентальные области; 3 – поднятия фундамента; 4 – эродированные дуги; 5 – переходные островодужные области; 6 – неэродированные дуги; 7 – рециклированные орогены.

Fig. 6. Diagrams of F–Q_m–L_t (a) and F–Q_t–L (b) by (Dickinson et al., 1983).

а. Sources of detrital material: 1 – craton interior; 2 – transitional continental; 3 – basement uplift; 4 – mixed; 5 – dissected arc; 6 – transitional arc; 7 – undissected arc; 8 – quartzose recycled; 9 – transitional recycled; 10 – lithic recycled.

б. Sources of detrital material: 1 – craton interior; 2 – transitional continental; 3 – basement uplift; 4 – dissected arc; 5 – transitional arc; 6 – undissected arc; 7 – recycled orogenic.

нов, каждая из которых вытянута субпараллельно простиранию орогена. К числу основных типов таких доменов, рассматриваемых как “блоки первого порядка” в структуре композитных орогенов, принадлежат: 1) магматические дуги; 2) аккрецированные или обдуцированные офиолитовые комплексы; 3) неометаморфические осевые пояса (неоднократно деформированные “пластины” коры окраин континентов, подвергшиеся воздействию высоких температур и давлений во время субдукции и последующей эксгумации); 4) реликты палеоокраин континентов; 5) орогенные кlastические клинья.

Изучение осадочных образований современных орогенных областей Средиземноморья и обрамления Индийского океана показало, что обломочный материал, образованный вследствие эрозии каждого такого домена, характеризуется достаточно уникальными соотношениями обломочных компонентов каркаса песчаников, ассоциациями тяжелых минералов и трендами изменения состава псаммитов во времени (Nichols et al., 1991; Marsaglia, Ingersoll, 1992; Cavazza et al., 1993; Garzanti et al., 2002, 2004, 2006, 2007; Garzanti, Ando, 2007a, б; Fontana et al., 2003). Примечательно, что первые четыре ти-

па источников поставляют в окружающие их области седиментации преимущественно петрогенную силикокlastику, тогда как орогенные кlastические клинья – в основном рециклированный/литогенный материал.

Слабо расчлененные магматические дуги сложены преимущественно базальтами, андезитами, риодацитами и, иногда, игнимбритами. При их эрозии в осадочные бассейны поступают в основном обломки вулканических пород, а также плагиоклазы и пироксены. В случае вскрытия диорит-гранодиоритовых батолитов, являющихся корнями вулканических ассоциаций, в осадок поступают кварц, плагиоклазы, калиевые полевые шпаты и роговая обманка. Таким образом, считается (Garzanti et al., 2007), что в составе песчаников, накапливающихся в приостроводужных бассейнах, параллельно с выведением на дневную поверхность массивов магматических пород постепенно увеличивается количество упомянутых зерен (рис. 7а). В целом точки составов орогенных псаммитов, формирующихся за счет данного источника обломочного материала, тяготеют к нижней половине диаграммы F–Q–L.

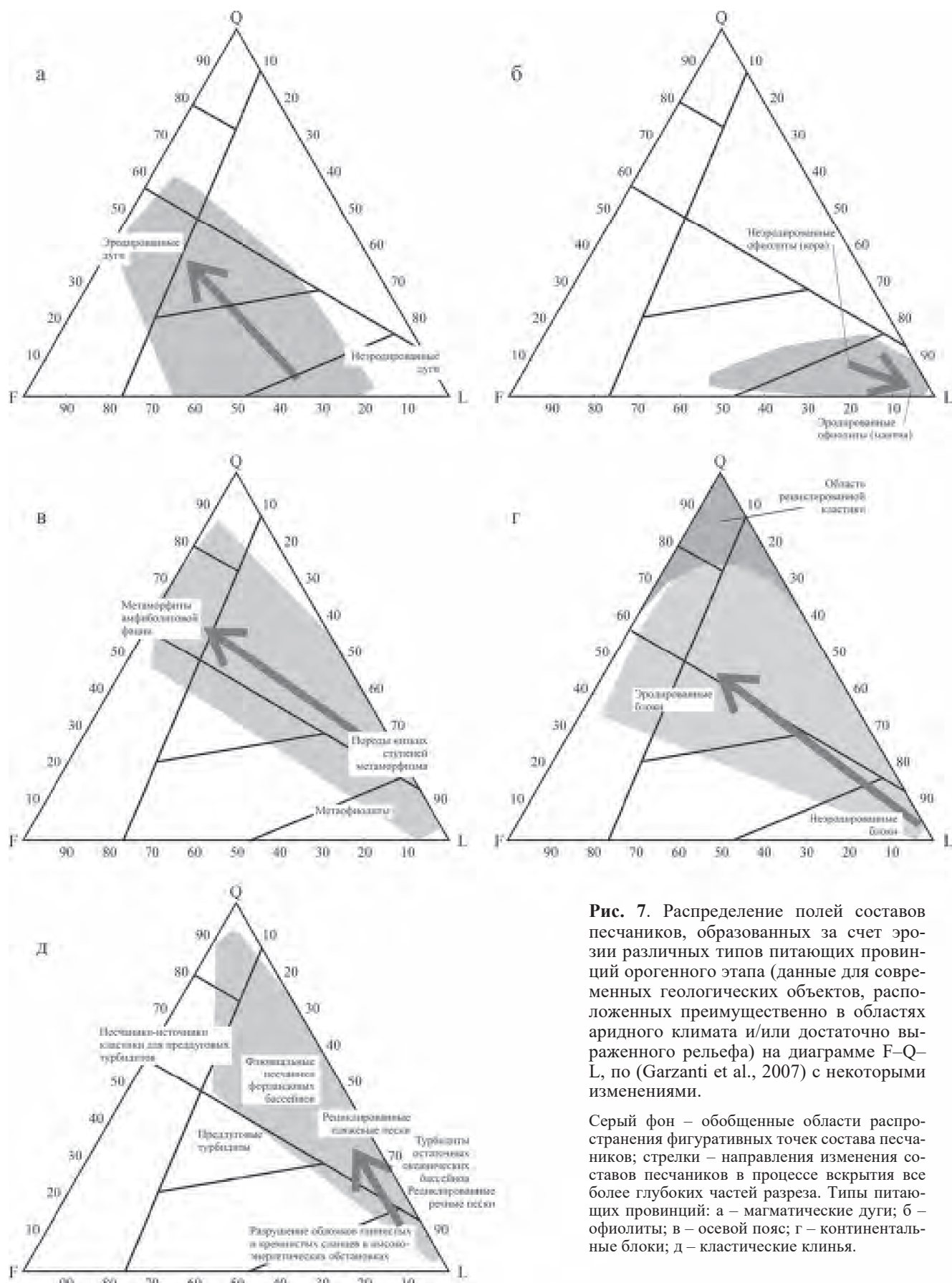


Рис. 7. Распределение полей составов песчаников, образованных за счет эрозии различных типов питающих провинций орогенного этапа (данные для современных геологических объектов, расположенных преимущественно в областях аридного климата и/или достаточно выраженного рельефа) на диаграмме F–Q–L, по (Garzanti et al., 2007) с некоторыми изменениями.

Серый фон – обобщенные области распространения фигуративных точек состава песчаников; стрелки – направления изменения составов песчаников в процессе вскрытия все более глубоких частей разреза. Типы питающих провинций: а – магматические дуги; б – офиолиты; в – осевой пояс; г – континентальные блоки; д – кластические клинья.

Fig. 7. Distribution of fields of sandstone compositions formed due to the erosion of various types of provenances of the orogenic stage (data for modern geological objects located mainly in areas of arid climate and/or quite pronounced relief) in the F–Q–L diagram, according to (Garzanti et al., 2007) with some changes.

Gray background – generalized areas of distribution of the sandstones data points; arrows – the direction of change in the composition of sandstones in the process of exhumation the deeper parts of the section). Provenance fields: a – magmatic arc; б – ophiolites; в – axial belt; г – continental block; д – clastic wedge.

Аккрецированные или обдущированные на континентальную кору офиолиты при разрушении представляют обломочный материал с рядом специфических петрографических и минералогических характеристик. При вскрытии все более глубоких уровней многослойной океанической литосферы в составе песчаников постепенно увеличивается доля обломков пород (см. рис. 7б). Пиллоу-лавы и комплекс параллельных даек являются источниками вулканокластиков, клинопироксенов или минералов низких ступеней метаморфизма. Из пород нижних горизонтов океанической коры в осадок поступают фрагменты габбро, плагиогранитов, кальциевые плагиоклазы, диопсиды, клинопироксены и роговая обманка, а серпентинизированные мантийные гарцбургиты являются источником лизардит-серпентиновых зерен. Совокупность фигуративных точек состава песчаников, формирующихся за счет размыва пород данного типа источника сноса, локализована в нижней части диаграммы F–Q–L и сдвинута в сторону вершины L.

Из осевого пояса неометаморфических покровов, представляющего в модели Э. Гарзанти с соавторами центральную часть коллизионных орогенов, в бассейн поступает лититовый и кварцевый материал, фрагменты метапелитов, метапсаммитов, а также метакarbonатные зерна. Присутствие здесь же блоки континентального фундамента служат источником кварц-полевошпатовой кластиков с роговой обманкой, а в различной степени метаморфизованные офиолиты – альбита, фрагментов metabазитов и полосчатых антигорт-серпентинитов. При вовлечении в размыв все более глубоких горизонтов офиолитовых покровов степень метаморфизма обломков пород возрастает, также увеличивается количество полевых шпатов в осадках. В результате с течением времени состав формирующихся песков/песчаников должен измениться от литаренитов до кварц-полевошпатовых разностей с минимальным содержанием обломков пород (рис. 7в).

Аллохтонные платформенные и пелагические отложения, накапливавшиеся в пределах нерасчлененных континентальных блоков, являются источником различных обломков пород – зерен известня-

ков, доломитов, кремней, глинистых сланцев, метакarbonатных пород и т. п. Иногда вместе с ними в песчаниках присутствует существенная доля кварца, полевых шпатов и/или вулканических/метавулканических фрагментов. Кристаллические породы фундамента служат источниками кварцевой или кварц-полевошпатовой кластиков со слюдой, гранатом, ставролитом и кианитом. Состав псаммитов, образованных за счет такого источника, с течением времени меняется от лититов и/или вулканокластических песчаников до кварц-аренитов (результат многократного переотложения кластиков) и кварц-полевошпатовых, редко – собственно полевошпатовых пород (рис. 7г).

Наконец, обломочные клинья, сложенные флювиальными и турбидитовыми образованиями, vyplнявшими предгорный, преддуговый или остаточный океанический бассейны, поставляют кластику, в составе которой существенную роль играет рециклированный кварц, а также обломки глинистых пород. Состав формирующихся за счет этого типа источника псаммитов меняется от преимущественно лититовых до кварц-полевошпатовых и существенно кварцевых, а общая совокупность их фигуративных точек на диаграмме F–Q–L расположена примерно параллельно стороне Q–L (рис. 7д).

В публикации (Marsaglia, 2004) приведена диаграмма K–Q_m–P, применяемая для установления возможного состава пород на палеоводосборах для песчаников первого седиментационного цикла (рис. 8). На ней, на основе данных (Hyndman, 1972),

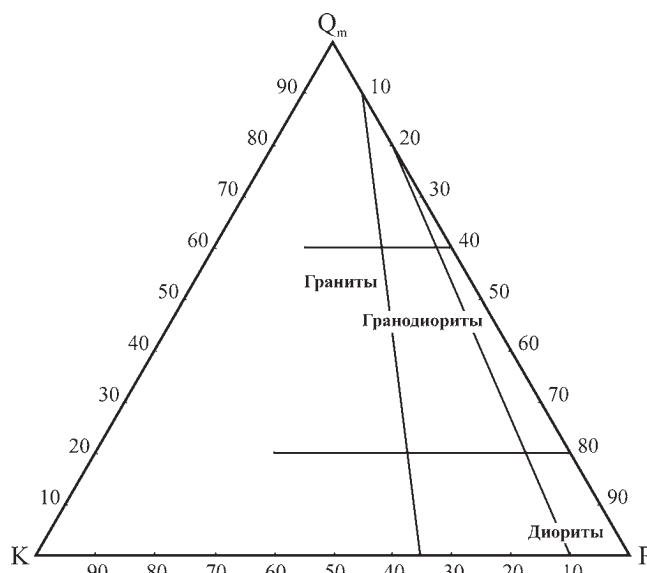


Рис. 8. Диаграмма K–Q_m–P (Marsaglia, 2004).

Пояснения см. в тексте.

Fig. 8. K–Q_m–P diagram (Marsaglia, 2004).

Explanations see in the text.

показаны референтные поля гранитов, гранодиоритов и диоритов.

ОБЛОМОЧНЫЙ КВАРЦ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СОСТАВА ПОРОД В ОБЛАСТЯХ СНОСА

В литературе известны и более тонкие, а соответственно, и более трудоемкие, методы оценки состава пород питающих провинций. Например, начиная с классической работы П. Крынина (Krupine, 1940) долгое время считалось, что характер волнистого погасания и состав включений в обломочных зернах монокристаллического кварца могут быть использованы в качестве индикатора типа их материнских пород. Краткий исторический обзор исследований в рамках данного направления можно найти в публикации (Blatt, Christie, 1963)⁶. В ней же показано, что магматические и метаморфические породы обладают существенным перекрытием основных характеристик волнистого погасания, и кроме того, исследование последнего должно вестись с помощью универсального столика. Однако в более поздней работе (Basu et al., 1975) на основе исследования обломочного кварца из известных источников сделан вывод, что в большинстве случаев результаты изучения волнистого погасания могут быть полезными для установления природы материнских образований, причем замеры можно вести и с помощью обычного петрографического микроскопа.

Было показано, что для идентификации возможных источников обломочного кварца следует использовать четыре параметра: 1) количество зерен с волнистым погасанием (угол погасания более 5°); 2) то же, без волнистого погасания; 3) количество зерен поликристаллического кварца; 4) количество индивидов кварца в зерне поликристаллического кварца. Все они учтены авторами при разработке ромбической диаграммы (рис. 9). В верхний треугольник этой диаграммы попадают образцы, в которых более 75% зерен поликристаллического кварца сложены 2–3 индивидами. Если число таких зерен менее 75% и, соответственно, число зерен с более чем 3 индивидами составляет более 25%, то фигуративные точки песчаников располагаются в нижнем треугольнике. Точное положение образца в треугольнике зависит от относительного количества зерен кварца без волнистого пога-

сания, с таким погасанием и поликристаллического кварца.

По данным (Willner et al., 2001), на указанной диаграмме А. Басу с соавторами распределение точек состава песчаников рифея и нижнего венда (дурюкская часть ашинской серии) Башкирского мегантиклинория позволяет сделать вывод, что источниками кластики для них выступали “породы средних и высоких ступеней метаморфизма”, тогда как песчаники верхнего венда (урюкская, басинская, куккараукская и зиганская свиты) сложены продуктами размыва “пород низких ступеней метаморфизма”. Последнее хорошо соотносится с типом присутствующих в них обломков пород.

Со ссылками на публикации (Bailey et al., 1958; Conolly, 1965) авторы работы (Basu et al., 1975) указывают, что региональные или локальные тектонические нарушения и складчатость могут вести к появлению структур напряжений в обломочном кварце уже в осадочных породах. Перекристаллизация кварца также уменьшает волнистое погасание. По эмпирическим данным (Blatt, Christie, 1963), кварц с волнистым погасанием менее стабилен, чем кварц без такового; поликристаллические зерна кварца под внешним воздействием также могут продуцировать монокристаллический кварц. Таким образом, чем дальше находится кварц, по образному выражению А. Басу и его соавторов в “осадочной мельнице”, тем ближе будет располагаться образуемое им поле фигуративных точек на ромбической диаграмме к ее левой вершине (“кварц без волнистого погасания”). Следовательно, применять указанную диаграмму к композиционно зрелым отложениям нельзя; по мнению предложивших ее авторов, она более всего подходит для анализа источников сноса незрелых (first-cycle) песчаников орогенных обстановок. Известно также, что между размерностью обломочных зерен кварца, количеством среди них фрагментов поликристаллического кварца и кварца с волнистым погасанием существует довольно тесная корреляция. В связи с этим при построении ромбической диаграммы, по данным (Basu et al., 1975), лучше всего использовать зерна размером 0.25–0.50 мм.

И.М. Симановичем (1978) предложена треугольная диаграмма “Кварц молодых гранитоидов и кислых эффузивов–кварц метаморфический и древних гранитоидов⁷–кварц жильный” (рис. 10).

⁶ Обзор этих и более поздних работ приведен в известной монографии И.М. Симановича (1978). В ней автором на обширном фактическом материале рассмотрена роль кварца как индикатора процессов седиментогенеза, проанализированы статистические данные о встречаемости типоморфных признаков в различных генетических типах кварца, а также разработана вероятностная полуколичественная методика определения первичных источников сноса обломочного кварца.

⁷ “Кварц древних гранитоидов” – это кварц гранитоидов древних кристаллических щитов/палингенных гранитоидов, “кварц молодых гранитоидов” – кварц типичных интрузивных гранитоидов, который отличается относительно высоким содержанием включений минералообразующей среды, а включения игольчатого рутила присутствуют, но значительно реже, чем в кварце древних гранитоидов. К жильному кварцу относится кварц гидротермальный и пневматолито-гидротермальный (Симанович, 1978, с. 11–12).

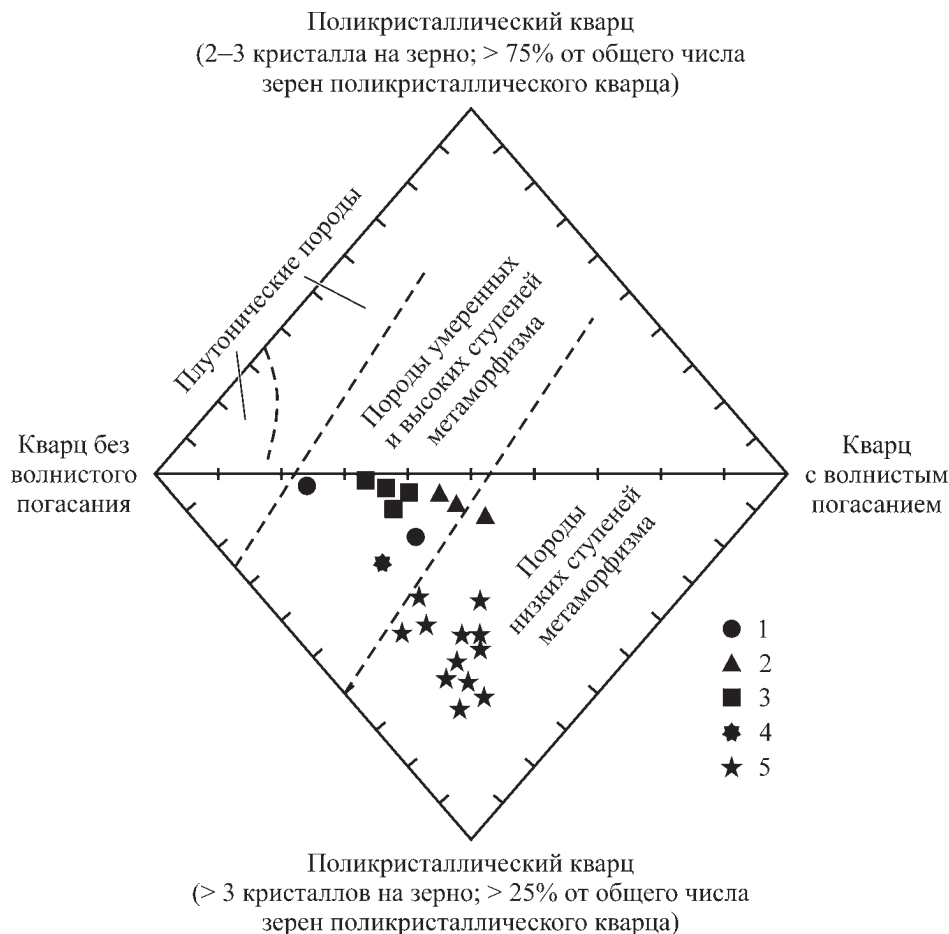


Рис. 9. Ромбическая диаграмма (Basu et al., 1975) для реконструкции состава пород в источниках сноса по данным исследования петрогенных псаммитов орогенных областей и положение на ней фигуративных точек различных типов кварца из песчаных пород рифея и венда Башкирского мегантиклинория, по (Willner et al., 2001).

Песчаники: 1 – нижнего рифея; 2 – среднего рифея; 3 – верхнего рифея; 4 – нижнего венда; 5 – верхнего венда. Также см. пояснения в тексте.

Fig. 9. Diamond diagram (Basu et al., 1975) for the reconstruction of the rock types in the provenances according to the study of petrogenic psammites of orogenic areas and the position on it of the data points of various types of quartz from Riphean and Vendian sandstones of the Bashkir meganticlinorium, according to (Willner et al., 2001).

Sandstones: 1 – Lower Riphean; 2 – Middle Riphean; 3 – Upper Riphean; 4 – Lower Vendian; 5 – Upper Vendian. Also see explanations in the text.

Анализ положения на данной диаграмме точек песчаных пород разного возраста позволили автору сделать вывод, что "...соотношение генетических типов обломочного кварца не зависит (или зависит незначительно) от зрелости пород, а обусловлено главным образом характером первичных источников сноса". По мнению автора, "намечается некоторая связь распределения генетических типов кварца с петрографическим типом песчаных пород. Можно предположить, что для кварцевых и олигомиктовых песчаных пород платформенного чехла наиболее характерно преобладание обломочного кварца метаморфического + (кварца) древних гранитоидов. В граувакках, как правило, наблюдает-

ся примерно равное соотношение кварца метаморфического + (кварца) древних гранитоидов и кварца жильного при низком содержании кварца молодых гранитоидов или резко повышенное содержание эффузивного кварца. ...повышенное содержание кварца молодых гранитоидов устанавливается в аркозах, источником сноса для которых служили области развития интрузивного гранитоидного магматизма" (Симанович, 1978, с. 40).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Настоящий обзор не претендует на исчерпывающее освещение всех существующих в литерату-



Рис. 10. Диаграмма “кварц молодых гранитоидов и кислых эффузивов–кварц метаморфический и древних гранитоидов–кварц жильный” (Симанович, 1978).

1 – стекольный песок из Подмосковья; 2 – кварцевые пески Черкасского месторождения; 3 – саксаульский кварцит из Примудожарья; 4 – юрские песчаники р. Амга; 5 – пески аллювия, р. Алдан; 6 – моренные пески, р. Ока; 7 – граувакки месторождения Кенкияк, Сев. Казахстан; 8 – граувакки Карагандинского бассейна; 9 – песчаники кампанского флиша, Северо-Западный Кавказ. Стрелками показано направление эволюции генетического состава обломочного кварца юрских песчаников, р. Амга.

Fig. 10. The diagram “quartz of young granitoids and acid effusive rocks–quartz of metamorphic rocks and ancient granitoids– vein quartz” (Simanovich, 1978).

1 – glass sand from the Moscow region; 2 – quartz sands Cherkassky deposit; 3 – Saksaul quartzite from Cis-Mugodzhary; 4 – Jurassic sandstones, Amga River; 5 – alluvium sands, Aldan River; 6 – moraine sands, Oka River; 7 – graywacke of the Kenkiyak deposit, Northern Kazakhstan; 8 – graywacke of the Karaganda basin; 9 – sandstones of the Campanian flysch, North-West Caucasus. The arrows indicate the direction of evolution of the genetic composition of detrital quartz of Jurassic sandstones, Amga River.

ре приемов, подходов и диаграмм, позволяющих с той или иной долей уверенности на основе данных о минералого-петрографическом составе песчаников реконструировать состав пород, служивших источниками обломочного материала. Мы лишь стремились напомнить читателям о их существовании, показать некоторую эволюцию представлений и подходов, а также продемонстрировать распределение на ряде диаграмм фигуративных точек состава песчаников различного возраста

та и геодинамической природы, принадлежащих к ряду крупных геологических структур Урала и Западной Сибири.

Псаммиты, выбранные нами для демонстрации возможностей рассмотренных в данной работе методов исследования песчаников разного состава и геодинамической природы, характеризуются следующими особенностями. На диаграмме В.Д. Шутова точки состава песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты рифея Башкирского мегантиклинория сконцентрированы преимущественно в полях кремнекlastито-кварцевых, мезомиктовых и полевошпат-кварцевых псаммитов. Сказанное предполагает либо некоторую переработку собственно аркозовой кластики перед окончательным захоронением, либо присутствие в составе песчаников обломочного материала из разных источников. Песчаники басинской свиты верхнего венда, в соответствии с представлениями В.Д. Шутова, являются типичными кварцевыми граувакками при подчиненной роли полевошпато-кварцевых граувакк, литокластито-кварцевых и мезомиктовых песчаников. Песчаники кодинской и устькодинской свит – также граувакки, но в основном кварц-полевошпатовые, а породы верхней (валанжинской) части сортынской свиты принадлежат преимущественно граувакковым аркозам.

В то же время, основываясь на положении точек состава указанных песчаников на диаграмме В.Н. Шванова, можно считать, что только по составу пород кодинской, устькодинской и сортынской свит можно в той или иной мере обоснованно судить о составе размывавшихся во время их формирования комплексов пород на палеоводосборах. Состав псаммитов бирьянской подсвиты зильмердакской свиты и басинской свиты в существенной мере трансформирован (в источниках сноса, на путях переноса и перед окончательным захоронением) и не позволяет получить полную информацию о породах в областях размыва.

Распределение точек состава песчаников ашинской серии верхнего венда Южного Урала, в том числе и басинской свиты, на диаграммах В. Дикинсона с соавторами позволяет сделать вывод, что они в основном сложены материалом, мобилизованным при разрушении рециклированных кварцсодержащих комплексов пород орогенов или переходных областей (Willner et al., 2001).

Следует подчеркнуть, что большинство ранее предпринятых исследований псаммитов верхнего докембрия Южного Урала основывалось на классическом подходе. Это не позволяет использовать сейчас все те преимущества, что дает метод Гацци-Дикинсона для интерпретации геодинамической природы размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород. Следовательно, перспективы в этом отношении для молодых исследователей представляются весьма и весьма существенными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Г.Н. (1966) Литологические особенности и условия образования отложений зильмердакской свиты докембрия западного склона Южного Урала. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Л.: ВСЕГЕИ, 20 с.
- Акимов Г.Н. (1967) Косая слоистость в породах зильмердакской свиты на Южном Урале. *Материалы по стратиграфии и тектонике Урала*. Л.: ВСЕГЕИ, 36-65.
- Акимов Г.Н., Казак А.П. (1965) Акцессорные минералы зильмердакской свиты Южного Урала. *Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала*. Вып. 4. М.: Недра, 10-21.
- Анфимов Л.В. (1978) Постдиагенетические преобразования и рациональная классификация кварцевых псаммитов рифея Центрально-Уральского поднятия на Южном Урале. *Докембрийские толщи Башкирского мегантиклинория на Южном Урале и их металлогения*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 25-32.
- Анфимов Л.В. (1988) Литогенез и эпигенетическое рудообразование в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГТ СО АН СССР, 33 с.
- Батурин В.П. (1947) Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.: АН СССР, 339 с.
- Беккер Ю.Р. (1968) Позднедокембрийская моласса Южного Урала. Л.: Недра, 160 с.
- Бергер М.Г. (1986) Терригенная минералогия. М.: Недра, 227 с.
- Гареев Э.З., Маслов А.В. (1992) Основные петрохимические особенности и условия образования аркозовых комплексов рифея и венда Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 50-60.
- Граувакки. (1972) (Отв. ред. В.Д. Шутов). М.: Наука, 345 с.
- Гринсмит Дж. (1981) Петрология осадочных пород. М.: Мир, 253 с.
- Гриффитс Дж. (1971) Научные методы исследования осадочных пород. М.: Мир, 421 с.
- Кац Ш.Н. (1978) Металлогенические аспекты регионального метаморфизма рифейских отложений западного склона Башкирского Урала. *Докембрийские толщи Башкирского мегантиклинория на Урале и их металлогения*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 49-55.
- Кац Ш.Н., Генина Л.А. (1976) Региональный метаморфизм горных пород Центрально-Уральского поднятия в пределах Башкирии. *Магматизм, метаморфизм, металлогения западного склона Урала*. Уфа: БФАН СССР, 43-51.
- Кузнецов В.Г. (2007) Литология. Осадочные горные породы и их изучение. М.: Недра-Бизнесцентр, 511 с.
- Кузнецов В.Г. (2011) Литология. Основы общей (теоретической) литологии. Учеб. пособие для вузов. М.: Науч. мир, 360 с.
- Курносов В.Б., Мурдмаа И.О. (1978) Глинистые минералы в современных осадках Охотского моря. *Океанология*, (2), 671-680.
- Кухаренко А.А. (1961) Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 318 с.
- Левитан М.А., Беляев Н.А., Буртман М.В., Дюплеси Ж.К., Хусид Т.А. (2003) История голоценовой седиментации в Южно-Новоземельском желобе. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 660-672.
- Левитан М.А., Васнер М., Нюрнберг Д., Шелехова Е.С. (1995) Средний состав ассоциаций глинистых минералов в поверхностном слое донных осадков Северного Ледовитого океана. *Докл. АН*, **344**(2), 364-366.
- Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. (2007) Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 404 с.
- Логвиненко Н.В. (1984) Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). М.: Высш. школа, 416 с.
- Маслов А.В. (1983) Основные петрографические особенности псаммитов пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты в стратотипическом разрезе. *Стратиграфия и литология верхнего докембрия и палеозоя Южного Урала и Приуралья*. Уфа: БФАН СССР, 12-17.
- Маслов А.В. (1988) Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. М.: Наука, 133 с.
- Маслов А.В. (1990) Рифейские аркозовые комплексы Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 29-42.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. (2008) Состав питающих провинций и особенности геологической истории поздневендского Мезенского бассейна. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 290-312.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В., Червяковская М.В. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы. *Литосфера*. В печати.
- Маслов А.В., Ялышева А.И., Подковыров В.Н., Главатских С.П., Граунов О.В., Сергеева Н.Д. (2016) Литохимический состав песчаников ашинской серии венда Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 347-374. DOI: 10.7868/S0024497X16040054
- Мельничук О.Ю. (2017) Песчаники и аргиллиты устькодинской свиты (верхний девон, восточный склон Среднего Урала): особенности состава и петрофонд. *Ежегодник-2016*. Тр. ИГТ УрО РАН. Вып. 164. Екатеринбург, 82-87.
- Мельничук О.Ю. (2018а) Позднедевонская дельтовая система на востоке Среднего Урала. *Вестник Пермского университета. Геология*, **17**(1), 18-30. DOI: 10.17072/psu.geol.17.1.18.
- Мельничук О.Ю. (2018б) Устькодинская свита фамена восточного склона Среднего Урала: фациально-генетические реконструкции. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*, **279**(3), 8-16. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-3-8-16.
- Мельничук О.Ю., Гуляева Т.Я., Рянская А.Д., Исаков А.Ю. (2018) Постседиментационные преобразования верхнедевонских и нижнекаменноугольных глинистых пород восточного склона Среднего Урала. *Экзолит-2018*. М.: МГУ, 64-66.
- Мельничук О.Ю., Рянская А.Д. (2017) Особенности вещественного состава аргиллитов кодинской свиты (верхний девон, восток Среднего Урала). *Литосфера*, **17**(3), 81-86. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-3-

071-086.

- Мельничук О.Ю., Фазлиахметов А.М. (2017) К вопросу о существовании микроконтинента в позднедевонское время на Среднем Урале. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*, № 20. Пермь: ПГНИУ, 148-155.
- Мизенс Г.А. (2000a) К геологической истории Южного Урала в среднем палеозое. *Докл. АН*, **371**(3), 356-357.
- Мизенс Г.А. (2000b) Осадочные комплексы позднего девона–карбона на юге Урала и проблема коллизии континентальных плит. *Палеозоны субдукции: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 65-84.
- Мизенс Г.А. (2002) Седиментационные бассейны и геодинамические обстановки в позднем девоне–ранней перми юга Урала. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 190 с.
- Мильнер Г.Б. (1968) Петрография осадочных пород. Т. II. Руководство по петрографии осадочных пород. М.: Недра, 594 с.
- Олли А.И. (1948) Древние отложения западного склона Урала. Саратов: СГУ, 407 с.
- Петтиджон Ф. Дж., Поттер П., Сивер Р. (1976) Пески и песчаники. М.: Мир, 536 с.
- Петтиджон Ф. Дж. (1981) Осадочные породы. М.: Недра, 751 с.
- Преображенский И.А., Саркисян С.Г. (1954) Минералы осадочных пород. М.: Гостоптехиздат, 462 с.
- Ратеев М.А., Садчикова Т.А., Шаброва В.П. (2008) Глинистые минералы в современных осадках Мирового океана и их связь с типами литогенеза. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 143-154.
- Селли Р.Ч. (1989) Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 294 с.
- Симанович И.М. (1978) Кварц песчаных пород. М.: Наука, 154 с.
- Стратиг. рифей. Стратиграфия. Геохронология. (1983) (Отв. ред. Б.М. Келлер, Н.М. Чумаков). М.: Наука, 184 с.
- Сульман А.М., Демчук И.Г. (1978) Глинистые минералы в рифейских осадочных отложениях Башкирского мегантиклинория. *Докембрийские толщи Башкирского мегантиклинория на Урале и их металлогения*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 16-24.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Титов Ю.В. (2012) К вопросу об условиях образования нижнемеловых отложений Большехетской впадины (на примере пласта БУ₁₈ Пякяхинского месторождения). *Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам Междунар. конф. студ., аспирант. и молодых ученых)*. Пермь: ПГНИУ, 347-350.
- Титов Ю.В., Шайхутдинова Г.Х., Астаркин С.В., Колпаков В.В., Кожевникова Н.В. (2019) Постседиментационные преобразования нижнемеловых отложений Большехетской впадины (Западная Сибирь). *Литосфера*, (1), 48-58.
- Тучкова М.И. (1996) Литология ниже-среднеюрских отложений Большого Кавказа (на примере северного и южного склонов Центрального Кавказа). Автореф. дис. ... канд. геол. мин.-наук. М.: ГИН АН СССР, 24 с.
- Тучкова М.И. (2007) Литология ниже-среднеюрских отложений Большого Кавказа (осадконакопление, минеральный состав, вторичные преобразования, палеогеографические и геодинамические следствия). *Большой Кавказ в альпийскую эпоху*. М.: ГЕОС, 141-214.
- Хисамутдинова А.И., Соловьев А.В., Рожкова Д.В. (2016) Реконструкция источников сноса среднеэоценовых отложений Западно-Камчатского осадочного бассейна (Тигильский район). *Литология и полез. ископаемые*, (4), 359-383. DOI: 10.7868/S0024497X16040030
- Шванов В.Н. (1987) Петрография песчаных пород (компонентный состав, система, описание минеральных видов). Л.: Недра, 269 с.
- Шутов В.Д. (1967) Классификация песчаников. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 86-103.
- Янакурт О.В. (2016) *Литология*. М.: Инфра-М, 359 с.
- Akarish A.I.M., El-Gohary A.M. (2008) Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *J. Afr. Earth Sci.*, **52**(1-2), 43-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.04.002>
- Allen J.R.L. (1962) Petrology, origin and deposition of the highest Lower Old Red Sandstone of Shropshire, England. *J. Sed. Petrol.*, **32**(4), 657-697. <https://doi.org/10.1306/74D70D49-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Allen J.R.L., Johnson C.L. (2010) Facies control on sandstone composition (and influence of statistical methods on interpretations) in the John Henry Member, Straight Cliffs Formation, Southern Utah, USA. *Sed. Geol.*, **230**(1-2), 60-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.06.023>
- Anani C. (1999) Sandstone petrology and provenance of the Neoproterozoic Voltaian Group in the southeastern Voltaian Basin, Ghana. *Sed. Geol.*, **128**(1-2), 83-98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00063-9)
- Arribas J., Alonso A., Mas R., Tortosa A., Rodas M., Barrenechea J.F., Rate J.A.-A., Artigas R. (2003) Sandstone petrography of continental depositional sequences of an intraplate rift basin: Western Cameros basin (North Spain). *J. Sed. Res.*, **73**(2), 309-327. DOI: <https://doi.org/10.1306/082602730309>
- Bailey S.W., Bell R.A., Peng C.J. (1958) Plastic deformation of quartz in nature. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **69**(11), 1443-1466. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1958\)69\[1443:PDOQIN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[1443:PDOQIN]2.0.CO;2)
- Basu A., Young S.W., Suttner L.J., James W.C., Mack G.H. (1975) Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *J. Sed. Petrol.*, **45**(4), 873-882. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F6E6F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Blatt H. (1985) Provenance studies and mudrocks. *J. Sed. Petrol.*, **55**(1), 69-75. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F8611-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Blatt H., Christie J.M. (1963) Undulatory extinction in quartz of igneous and metamorphic rocks and its significance in provenance studies of sedimentary rocks. *J. Sed. Petrol.*, **33**(3), 559-579. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D70EBB-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Calvo C. (2003) Provenance of plutonic detritus in cover sandstones of Nicoya Complex, Costa Rica: Cretaceous unroofing history of a Mesozoic ophiolite se-

- quence. *GSA Bull.*, **115**(7), 832-844. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)115<0832:POPDIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)115<0832:POPDIC>2.0.CO;2)
- Cavazza W., Zuffa G.G., Camporesi C., Ferretti C. (1993) Sedimentary recycling in a temperate climate drainage basin (Senio River, north-central Italy): composition of source rock, soil profiles, and fluvial deposits. *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Eds. M.J. Johnsson, A. Basu *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **284**, 247-261. DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE284-p247>
- Conolly, J.R. (1965) The occurrence of polycrystallinity and undulatory extinction in quartz in sandstones. *J. Sed. Petrol.*, **35**(1), 116-135. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D71208-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson W.R. (1982) Compositions of sandstones in Circum-Pacific subduction complexes and fore-arc basins. *AAPG Bull.*, **66**(2), 121-137. DOI: 10.1306/03B59A4E-16D1-11D7-8645000102C1865D
- Dickinson W.R. (1970) Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *J. Sed. Petrol.*, **40**(2), 695-707. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D72018-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson W.R. (1985) Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. Provenance of Arenites. Ed. G.G. Zuffa. NATO, Advanced Study Institute Series, 148, 333-361. DOI: 10.1007/978-94-017-2809-6_15
- Dickinson W.R., Bead L.S., Brakenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T. (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**(2), 222-235. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<222:PONAPS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2)
- Dickinson W.R., Suzek C.A. (1979) Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bull.*, **63**(12), 2164-2182. DOI: 10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D
- Ehrmann W.E., Melles M., Kuhn G., Grobe H. (1992) Significance of clay minerals assemblages in the Antarctic Ocean. *Mar. Geol.*, **107**(4), 249-273. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90075-S](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90075-S)
- Fontana D., Parea G.C., Bertacchini M., Bessi P. (2003) Sand production by chemical and mechanical weathering of well lithified siliciclastic turbidites of the Northern Apennines (Italy). *Quantitative provenance studies in Italy*. Eds. R. Valloni, A. Basu. *Mem. Descr. Carta Geol. Ital.*, **61**, 51-60.
- Garzanti E., Ando S. (2007a) Heavy-mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Heavy minerals in use*. Eds. M. Mange, D. Wright. *Develop. Sediment.*, **58**, 567-598. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58020-9](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58020-9)
- Garzanti E., Ando S. (2007b) Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands. *Heavy minerals in use*. Eds. M. Mange, D. Wright. *Develop. Sediment.*, **58**, 741-763. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58029-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58029-5)
- Garzanti E., Ando S., Vezzoli G. (2006) The continental crust as a source of sand (southern Alps crosssection, northern Italy). *J. Geol.*, **114**(5), 533-554. DOI: 10.1086/506159
- Garzanti E., Doglioni C., Vezzoli G., Ando S. (2007) Orogenic Belts and Orogenic Sediment Provenance. *J. Geol.*, **115**(3), 315-334. DOI: 10.1086/512755
- Garzanti E., Vezzoli G., Ando S. (2002) Modern sand from obducted ophiolite belts (Sultanate of Oman and United Arab Emirates). *J. Geol.*, **110**(4), 371-391. DOI: 10.1086/340440
- Garzanti E., Vezzoli G., Lombardo B., Ando S., Mauri E., Monguzzi S., Russo M. (2004) Collision-orogen provenance (western and central Alps): detrital signatures and unroofing trends. *J. Geol.*, **112**(2), 145-164. DOI: 10.1086/381655
- Gazzi P. (1966) Le arenarie del flysch sopracretaceo dell'Appennino modenese; correlazioni con il flysch di Monghidoro. *Mineral. Petrogr. Acta*, **12**, 69-97.
- González-Acebrón L., Arribas J., Mas R. (2007) Provenance of fluvial sandstones at the start of late Jurassic-Early Cretaceous rifting in the Cameros Basin (N. Spain). *J. Sed. Geol.*, **202**(1-2), 138-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.05.008>
- Graham S.A., Tolson R.B., Decelles P.G., Ingersoll R.V., Bargar E., Caldwell M., Cavazza W., Edwards D.P., Follo M.F., Handschy J.F., Lemke L., Moxton I., Rice R., Smith G.A., White J. (1986) Provenance modelling as a technique for analysing source terrane evolution and controls on foreland. Foreland Basins. Eds. P.A. Allen, P. Homewood. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, **8**, 425-436. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444303810.ch23>
- Griffin J.J., Windom H., Goldberg E.D. (1968) The distribution of clay minerals in the World Ocean. *Deep-Sea Res.*, **15**(4), 433-459. DOI: [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90051-X)
- Haughton P.D.W., Todd S.P., Morton A.C. (1991) Sedimentary provenance studies. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Eds. A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **57**, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.01>
- Hyndman D.W. (1972) Petrology of igneous rocks. N.Y.: McGraw-Hill, 533 p. DOI: 10.1029/RG025i005p01021
- Ingersoll R.V. (1990) Actualistic sandstone petrofacies: Discriminating modern and ancient source rocks. *J. Geol.*, **18**(8), 733-736. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0733:ASPDMA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0733:ASPDMA>2.3.CO;2)
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Pickle J.D., Sares S.W. (1984) The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *J. Sed. Petrol.*, **54**(1), 103-116. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Krylov A., Andreeva I., Vogt C., Backman J., Krupskaya V.V., Grikurov G.E., Moran K., Shoji H. (2008) A shift in heavy and clay mineral provenance indicates a middle Miocene onset of a perennial sea-ice cover in the Arctic Ocean. *Paleoceanography*, **23**(1), Paper PA1S06. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007PA001497>
- Krynine P.D. (1940) Petrology and genesis of the Third Bradford Sand. *The Pennsylvania State College Bull.*, **29**, 134 p.
- Leitch E.C., Cawood P.A. (1987) Provenance determination of volcanoclastic rocks: the nature and tectonic significance of a Cambrian conglomerate from the New England Fold Belt, eastern Australia. *J. Sed. Petrol.*, **57**(4), 630-638. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F8BC0-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Mack G.H. (1984) Exceptions to the relationship between plate tectonics and sandstone composition. *J. Sed. Petrol.*,

- 54(1), 212-220. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F83E6-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Marsaglia K.M. (2004) Sandstone detrital modes support Magdalena Fan displacement from the mouth of the Gulf of California. *J. Geol.*, **32**(1), 45-48. DOI: <https://doi.org/10.1130/G20099.1>
- Marsaglia K.M., Ingersoll R.P. (1992) Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: a reassessment of magmatic-arc provenance. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **104**(12), 1637-1649. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1637:CTIARD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1637:CTIARD>2.3.CO;2)
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P., Grazhdan-kin D.V., Podkovyrov V.N. (2008) Composition of sediment provenances and patterns in geological history of the Late Vendian Mezen Basin. *Lithol. Miner. Res.*, **43**(3), 260-280. DOI: <https://doi.org/10.1134/S002449020803005X>
- Nichols G., Kusnana S., Hall R. (1991) Sandstones of arc and ophiolite provenance in backarc basin, Halmahera, eastern Indonesia. *Developments in sedimentary provenance studies*. Eds. A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **57**, 291-303. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.22>
- Nürnberg D., Levitan M.A., Pavlidis J.A., Shelekhova E.S. (1995) Distribution of clay minerals in surface sediments from the eastern Barents and southwestern Kara seas. *Geol. Rundschau*, **84**(3), 665-682. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00284528>
- Petschick R., Kuhn G., Ginge F.X. (1996) Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: Sources, transport, and relation to oceanography. *Mar. Geol.*, **130**(3-4), 203-229. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00148-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00148-4)
- Rossak B., Kassens H., Lange H., Thiede J. (1999) Clay mineral distribution in surface sediments of the Laptev Sea: Indicator for sediment provinces, dynamics and sources. *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*. (Eds. H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede, L. Timokhov). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 587-599. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7_45
- Rudnik R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treatise Geochem.*, **3**, 1-64. DOI: [10.1016/B0-08-043751-6/03016-4](https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4)
- Sediment Provenance. Influences on Compositional Change from Source to Sink (2017) (Ed. R. Mazumder). Elsevier, 2017, 600 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803386-9.00001-0>
- Suttner L.J. (1974) Sedimentary petrographic provinces: an evaluation. *Paleogeographic Provinces and Provinciality, SEPM Spec. Publ.*, **21**, 75-84.
- Van der Plas L., Tobi A.C. (1965) A chart for judging the reliability of point counting results. *Amer. J. Sci.*, **263**(1), 87-90. DOI: [10.2475/ajs.263.1.87](https://doi.org/10.2475/ajs.263.1.87)
- Veizer J., Jansen S.L. (1985) Basement and sediment recycling-2: Time dimension to global tectonics. *J. Geol.*, **93**(6), 625-643. DOI: [10.1086/628992](https://doi.org/10.1086/628992)
- Velbel M.A. (1980) Petrography of subduction zone sandstones. *J. Sed. Petrol.*, **50**(1), 303-304. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F79E1-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Vogt C., Knies J. (2008) Sediment dynamics in the Eurasian Arctic Ocean during the last deglaciation – The clay mineral group smectite perspective. *Mar. Geol.*, **250**(3-4), 211-222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.01.006>
- Vogt C., Knies J. (2009) Sediment pathways in the western Barents Sea inferred from clay mineral assemblages in surface sediments. *Norwegian J. Geol.*, **89**(1), 41-55.
- von Eynatten H. (2003) Petrography and chemistry of sandstones from the Swiss Molasse Basin: an archive of the Oligocene to Miocene evolution of the Central Alps. *Sedimentology*, **50**(4), 703-724. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00571.x>
- Wahsner M., Müller C., Stein R., Ivanov G., Levitan M., Shelekhova E., Tarasov G. (1999) Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways – A synthesis. *Boreas*, **28**(1), 215-233. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00216.x>
- Weltje G.J. (1994) Provenance and dispersal of sand-sized sediments: Reconstruction of dispersal patterns and sources of sand-sized sediments by means of inverse modeling techniques. Utrecht: Universite in Utrecht, Ser. Geol. Ultraiectina. 121. 208 p.
- Weltje G.J. (2002) Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth-Sci. Rev.*, **57**(3-4), 211-253. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00076-9)
- Willner A.P., Ermolaeva T., Stroink L., Glasmacher U.A., Giese U., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Walter R. (2001) Contrasting provenance signals in Riphean and Vendian sandstones in the SW Urals (Russia): constraints for a change from passive to active continental margin conditions in the Neoproterozoic. *Prec. Res.*, **110**, 215-239.
- Winkler A., Wolf-Welling T.C.W., Stattegger K., Thiede J. (2002) Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep-sea basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG). *Intern. J. Earth Sci.*, **91**(1), 133-148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s005310100199>
- Yuste A., Luzon A., Bauluz B. (2004) Provenance of Oligocene-Miocene alluvial and fluvial fans of the northern Ebro Basin (NE Spain): an XRD, petrographic and SEM study. *Sed. Geol.*, **172**(3-4), 251-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.10.001>
- Zhang K.-J., Zhang Y.-X., Xia B.-D., He Y.-B. (2006) Temporal variations of Mesozoic sandstone compositions in the Qiangtang block, Northern Tibet (China): implications for provenance and tectonic setting. *J. Sed. Res.*, **76**(8), 1035-1048. DOI: <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.089>
- Zuffa G.G. (1980) Hybrid arenites: their composition and classification. *J. Sed. Petrol.*, **50**(1), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F7950-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Zuffa G.G. (1985) Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. *Provenance of Arenites. NATO Asi Ser. (Ser. C)*, **148**. Ed. G.G. Zuffa. Dordrecht: Reidel Publ., 165-189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_8

REFERENCES

- Akarish A.I.M., El-Gohary A.M. (2008) Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *J. Afr. Earth Sci.*, **52**(1-2), 43-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.04.002>
- Akimova G.N. (1966) *Litologicheskie osobennosti i usloviya obrazovaniya otlozhenii zil'merdakskoi svity dokembriya zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala*. Dis. kand. geol.-min. nauk [Specific litological features and sedimentation conditions of the Zil'merdak Formation (the Southern Urals western slope). Cand. geol. and min. sci. diss., author's abstract]. Leningrad, VSEGEI Publ., 20 p. (In Russian)
- Akimova G.N. (1967) Cross bedding in the Zilmerdak Formation rocks in the Southern Urals. *Materialy po stratigrafii i tektonike Urala* [Materials on stratigraphy and tectonics of the Urals]. Leningrad, VSEGEI Publ., 36-65. (In Russian)
- Akimova G.N., Kazak A.P. (1965) Accessory minerals of the Zilmerdak Formation of the Southern Urals. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Yuzhnogo Urala* [Materials on geology and minerals of the Southern Urals]. V. 4. Moscow, Nedra Publ., 10-21. (In Russian)
- Allen J.R.L. (1962) Petrology, origin and deposition of the highest Lower Old Red Sandstone of Shropshire, England. *J. Sed. Petrol.*, **32**(4), 657-697. <https://doi.org/10.1306/74D70D49-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Allen J.R.L., Johnson C.L. (2010) Facies control on sandstone composition (and influence of statistical methods on interpretations) in the John Henry Member, Straight Cliffs Formation, Southern Utah, USA. *Sed. Geol.*, **230**(1-2), 60-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.06.023>
- Anani C. (1999) Sandstone petrology and provenance of the Neoproterozoic Voltaian Group in the southeastern Voltaian Basin, Ghana. *Sed. Geol.*, **128**(1-2), 83-98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00063-9)
- Anfimov L.V. (1978) Postdiagenesis transformation and rational classification of the Riphean quartzous sandstones, Central Urals uplift (the Southern Urals). *Dokembriiskie tolshchi Bashkirskogo megantiklinoriya na Yuzhnom Urale i ikh metallogeniya* [Precambrian formations of the Baskirian meganticlinorium (the Southern Urals) and their metallogeny]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 25-32. (In Russian)
- Anfimov L.V. (1988) *Litogenez i epigeneticheskoe rudobrazovanie v rifeiskikh osadochnykh tolshchakh Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyi Ural)*. Avtoref. dis. dokt. geol.-min. nauk [Lithogenesis and epigenetic mineralization in the Riphean series, Bashkirian meganticlinorium (the Southern Urals). Dr. geol. and min. sci. diss. author's abstract]. Novosibirsk, IGG SO AN SSSR Publ., 33 p. (In Russian)
- Arribas J., Alonso A., Mas R., Tortosa A., Rodas M., Barenchea J.F., Rate J.A.-A., Artigas R. (2003) Sandstone petrography of continental depositional sequences of an intraplate rift basin: Western Cameros basin (North Spain). *J. Sed. Res.*, **73**(2), 309-327. DOI: <https://doi.org/10.1306/082602730309>
- Bailey S.W., Bell R.A., Peng C.J. (1958) Plastic deformation of quartz in nature. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **69**(11), 1443-1466. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1958\)69\[1443:PDOQIN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[1443:PDOQIN]2.0.CO;2)
- Basu A., Young S.W., Suttner L.J., James W.C., Mack G.H. (1975) Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *J. Sed. Petrol.*, **45**(4), 873-882. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F6E6F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Baturin V.P. (1947) *Petrograficheskii analiz geologicheskogo proshlogo po terrigennym komponentam* [Petrographic analysis of the geological past using by the sedimentary components]. Moscow, AN SSSR Publ., 339 p. (In Russian)
- Bekker Yu.R. (1968) *Pozdnedokembriiskaya molassa Yuzhnogo Urala* [Late Precambrian molasse of the Southern Urals]. Leningrad, Nedra Publ., 160 p. (In Russian)
- Berger M.G. (1986) *Terrigennaya mineralogiya* [Sedimentary mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 227 p. (In Russian)
- Blatt H. (1985) Provenance studies and mudrocks. *J. Sed. Petrol.*, **55**(1), 69-75. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F8611-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Blatt H., Christie J.M. (1963) Undulatory extinction in quartz of igneous and metamorphic rocks and its significance in provenance studies of sedimentary rocks. *J. Sed. Petrol.*, **33**(3), 559-579. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D70EBB-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Calvo C. (2003) Provenance of plutonic detritus in cover sandstones of Nicoya Complex, Costa Rica: Cretaceous unroofing history of a Mesozoic ophiolite sequence. *GSA Bull.*, **115**(7), 832-844. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)115<0832:POPDIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)115<0832:POPDIC>2.0.CO;2)
- Cavazza W., Zuffa G.G., Camporesi C., Ferretti C. (1993) Sedimentary recycling in a temperate climate drainage basin (Senio River, north-central Italy): composition of source rock, soil profiles, and fluvial deposits. *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Eds. M.J. Johnsson, A. Basu. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **284**, 247-261. DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE284-p247>
- Conolly, J.R. (1965) The occurrence of polycrystallinity and undulatory extinction in quartz in sandstones. *J. Sed. Petrol.*, **35**(1), 116-135. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D71208-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson W.R. (1982) Compositions of sandstones in Circum-Pacific subduction complexes and fore-arc basins. *AAPG Bull.*, **66**(2), 121-137. DOI: [10.1306/03B59A4E-16D1-11D7-8645000102C1865D](https://doi.org/10.1306/03B59A4E-16D1-11D7-8645000102C1865D)
- Dickinson W.R. (1970) Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *J. Sed. Petrol.*, **40**(2), 695-707. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D72018-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson W.R. (1985) Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. Provenance of Arenites. Ed. G.G. Zuffa. NATO, Advanced Study Institute Series, 148, 333-361. DOI: [10.1007/978-94-017-2809-6_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15)
- Dickinson W.R., Bead L.S., Brakenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T. (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**(2), 222-235. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<222:POPSAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:POPSAN>2.0.CO;2)

- org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2
- Dickinson W.R., Suzek C.A. (1979) Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bull.*, **63**(12), 2164-2182. DOI: 10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D
- Ehrmann W.E., Melles M., Kuhn G., Grobe H. (1992) Significance of clay minerals assemblages in the Antarctic Ocean. *Mar. Geol.*, **107**(4), 249-273. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90075-S](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90075-S)
- Fontana D., Parea G.C., Bertacchini M., Bessi P. (2003) Sand production by chemical and mechanical weathering of well lithified siliciclastic turbidites of the Northern Apennines (Italy). *Quantitative provenance studies in Italy*. Eds. Valloni R., Basu A. *Mem. Descr. Carta Geol. Ital.*, **61**, 51-60.
- Gareev E.Z., Maslov A.V. (1992) Basic petrochemical features and sedimentary conditions of the Southern Urals Riphean and Vendian arkose formations. *Litol. Polez. Iskopaemye*, (3), 50-60. (In Russian)
- Garzanti E., Ando S. (2007a) Heavy-mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Heavy minerals in use*. Eds. M. Mange, D. Wright. *Develop. Sediment.*, **58**, 567-598. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58020-9](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58020-9)
- Garzanti E., Ando S. (2007b) Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands. *Heavy minerals in use*. Eds. M. Mange, D. Wright. *Develop. Sediment.*, **58**, 741-763. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58029-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58029-5)
- Garzanti E., Ando S., Vezzoli G. (2006) The continental crust as a source of sand (southern Alps crosssection, northern Italy). *J. Geol.*, **114**(5), 533-554. DOI: 10.1086/506159
- Garzanti E., Doglioni C., Vezzoli G., Ando S. (2007) Orogenic Belts and Orogenic Sediment Provenance. *J. Geol.*, **115**(3), 315-334. DOI: 10.1086/512755
- Garzanti E., Vezzoli G., Ando S. (2002) Modern sand from obducted ophiolite belts (Sultanate of Oman and United Arab Emirates). *J. Geol.*, **110**(4), 371-391. DOI: 10.1086/340440
- Garzanti E., Vezzoli G., Lombardo B., Ando S., Mauri E., Monguzzi S., Russo M. (2004) Collision-orogen provenance (western and central Alps): detrital signatures and unroofing trends. *J. Geol.*, **112**(2), 145-164. DOI: 10.1086/381655
- Gazzi P. (1966) Cretaceous sandstones of the Alpine flysch: correlation with Monghidoro flysch. *Mineral. Petrogr. Acta*, **12**, 69-97. (In Italian)
- González-Acebrón L., Arribas J., Mas R. (2007) Provenance of fluvial sandstones at the start of late Jurassic-Early Cretaceous rifting in the Cameros Basin (N. Spain). *J. Sed. Geol.*, **202**(1-2), 138-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.05.008>
- Graham S.A., Tolson R.B., Decelles P.G., Ingersoll R.V., Bargar E., Caldwell M., Cavazza W., Edwards D.P., Follo M.F., Handschy J.F., Lemke L., Moxton I., Rice R., Smith G.A., White J. (1986) Provenance modelling as a technique for analysing source terrane evolution and controls on foreland. Foreland Basins. Eds. Allen P.A., Homewood P. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, **8**, 425-436. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444303810.ch23>
- Grauvakki [Greywacke]. (1972) (Ed. V.D. Shutov). Moscow, Nauka Publ., 345 p. (In Russian)
- Griffin J.J., Windom H., Goldberg E.D. (1968) The distribution of clay minerals in the World Ocean. *Deep-Sea Res.*, **15**(4), 433-459. DOI: [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90051-X)
- Griffiths J. (1971) *Nauchnye metody issledovaniy osadochnykh porod* [Scientific methods for the study of sedimentary rocks]. Moscow, Mir Publ., 421 p. (In Russian)
- Grinsmit Dzh. (1981) *Petrologiya osadochnykh porod* [Sedimentary rocks petrography]. Moscow, Mir Publ., 253 p. (In Russian)
- Haughton P.D.W., Todd S.P., Morton A.C. (1991) Sedimentary provenance studies. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Eds. A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Pub.*, **57**, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.01>
- Hyndman D.W. (1972) Petrology of igneous rocks. N.Y.: McGraw-Hill, 533 p. DOI: 10.1029/RG025i005p01021
- Ingersoll R.V. (1990) Actualistic sandstone petrofacies: Discriminating modern and ancient source rocks. *J. Geol.*, **18**(8), 733-736. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0733:ASPDMA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0733:ASPDMA>2.3.CO;2)
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Pickle J.D., Sares S.W. (1984) The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *J. Sed. Petrol.*, **54**(1), 103-116. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Kats Sh.N. (1978) Metallogeny features of the regional metamorphism of Riphean deposits in the Southern Urals. *Doklady Akad. Nauk SSSR*, **235**(1), 103-106. (In Russian)
- Kats Sh.N., Genina L.A. (1976) Regional metamorphism of rocks of the Central Ural uplift within Bashkiria. *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya zapadnogo sklona Urala i ikh metallogeniya* [Precambrian formations of the Baskirian meganticlinorium (the Southern Urals) and their metallogeny]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 49-55. (In Russian)
- Kats Sh.N., Genina L.A. (1976) Regional metamorphism of rocks of the Central Ural uplift within Bashkiria. *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya zapadnogo sklona Urala* [Magmatic activity, metamorphism and metallogeny of the Western Urals]. Ufa, BFAN SSSR Publ., 43-51. (In Russian)
- Khisamutdinova A.I., Solov'ev A.V., Rozhkova D.V. (2016) Provenance analysis for Middle Eocene sediments in the West Kamchatka sedimentary basin (Tigil area). *Lithol. Min. Res.*, **51**(4), 310-332 (translated from *Litologiya i polez. iskopaemye*, (4), 359-383). DOI: 10.1134/S0024490216040039
- Krylov A., Andreeva I., Vogt C., Backman J., Krupskaya V.V., Grikurov G.E., Moran K., Shoji H. (2008) A shift in heavy and clay mineral provenance indicates a middle Miocene onset of a perennial sea-ice cover in the Arctic Ocean. *Paleoceanography*, **23**(1), Paper PA1S06. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007PA001497>
- Krynine P.D. (1940) Petrology and genesis of the Third Bradford Sand. *The Pennsylvania State College Bull.*, **29**, 134 p.
- Kukharensky A.A. (1961) *Mineralogiya rossypei* [Mineralogy of placers]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 318 p. (In Russian)
- Kurnosov V.B., Murdmaa I.O. (1978) Clay minerals of the Sea of Okhotsk modern sediments. *Okeanologiya*, (2), 671-680. (In Russian)
- Kuznetsov V.G. (2007) *Litologiya. Osadochnye gornye porody i ikh izuchenie* [Lithology. Sedimentary rocks and their study]. Moscow, Nedra-Business Center Ltd. Publ., 511 p. (In Russian)
- Kuznetsov V.G. (2011) *Litologiya. Osnovy obshchei (teo-*

- reticheskoi) litologii* [Lithology. Theory basics]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 360 p. (In Russian)
- Leitch E.C., Cawood P.A. (1987) Provenance determination of volcanoclastic rocks: the nature and tectonic significance of a Cambrian conglomerate from the New England Fold Belt, eastern Australia. *J. Sed. Petrol.*, **57**(4), 630-638. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F8BC0-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Levitan M.A., Belyaev N.A., Burtman M.V., Dyuplessi ZH.K., Khusid T.A. (2003) Holocene sedimentation history in the Southern Novaya Zemlya trench. *Litol. Polez. Iskopaemye*, (6), 660-672. (In Russian)
- Levitan M.A., Lavrushin Yu.A., Shtain R. (2007) *Ocherki istorii sedimentatsii v Severnom Ledovitom okeane i moryakh Subarktiki v techenie poslednikh 130 tys. let* [130 ky sedimentary history before present in the Subarctic seas]. Moscow, GEOS Publ., 404 p. (In Russian)
- Levitan M.A., Vasner M., Nyurnberg D., Shelekhova E.S. (1995) Average composition of clay mineral associations in the surface layer of bottom sediments of the Arctic ocean. *Dokl. Akad. Nauk*, **344**(2), 364-366. (In Russian)
- Logvinenko N.V. (1984) *Petrografiya osadochnykh porod (s osnovami metodiki issledovaniya)* [Sedimentary rocks petrography (with research technique basics)]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 416 p. (In Russian)
- Mack G.H. (1984) Exceptions to the relationship between plate tectonics and sandstone composition. *J. Sed. Petrol.*, **54**(1), 212-220. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F83E6-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Marsaglia K.M. (2004) Sandstone detrital modes support Magdalena Fan displacement from the mouth of the Gulf of California. *J. Geol.*, **32**(1), 45-48. DOI: <https://doi.org/10.1130/G20099.1>
- Marsaglia K.M., Ingersoll R.P. (1992) Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: a reassessment of magmatic-arc provenance. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **104**(12), 1637-1649. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1637:CTIARD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1637:CTIARD>2.3.CO;2)
- Maslov A.V. (1983) Basic petrographic features of the Zilmerdak Formation Bir'yan Member stratotype sandstones. *Stratografiya i litologiya verkhnego dokembriya i paleozoya Yuzhnogo Urala i Priural'ya* [Upper Precambrian and Paleozoic stratigraphy and lithology of the Southern Urals and Cisurals]. Ufa, BFAN SSSR Publ., 12-17. (In Russian)
- Maslov A.V. (1988) *Litologiya verkhnerifeiskikh otlozhenii Bashkirskogo megantiklinorija* [Riphean series lithology (Bashkirian meganticlinorium)]. Moscow, Nauka Publ., 133 p. (In Russian)
- Maslov A.V. (1990) Riphean arkose formations of the Southern Urals. *Litol. Polez. Iskopaemye*, (4), 29-42. (In Russian)
- Maslov A.V., Melnichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Litosfera*. In Print.
- Maslov A.V., Yalysheva A.I., Podkovyrov V.N., Glavatskikh S.P., Graunov O.V., Sergeeva N.D. (2016) Lithochemical composition of sandstones of the Vendian Asha Group, South Urals. *Litol. Miner. Resour.*, **51**(5), 402-430. DOI: [10.1134/S0024490216040052](https://doi.org/10.1134/S0024490216040052)
- Mel'nychuk O.Yu. (2017) Mudstones and sandstones of the Upper Devonian Ust'kodinka Formation (the Middle Urals eastern slope): specific composition features and source. *Ezhegodnik-2016*. Tr. IGG UrO RAN. Vyp. 164. Ekaterinburg, 82-87. (In Russian)
- Mel'nychuk O.Yu. (2018a) Late Devonian deltaic system (Middle Urals eastern slope). *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, **17**(1), 18-30. DOI: [10.17072/psu.geol.17.1.18](https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.18). (In Russian)
- Mel'nychuk O.Yu. (2018b) Famienian Ust'kodinka Formation in the Middle Urals eastern slope: facial and genetic reconstructions. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*, **279**(3), 8-16. DOI: [10.19110/2221-1381-2018-3-8-16](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-3-8-16). (In Russian)
- Mel'nychuk O.Yu., Fazliakhmetov A.M. (2017) Revisiting the Upper Devonian micritic existence in the Middle Urals. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo No. 20* [Mineralogy, petrography and metallogeny problems. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky, No. 20]. Perm, Perm. St. Univ Publ., 148-155. (In Russian)
- Mel'nychuk O.Yu., Gulyaeva T.Ya., Ryanskaya A.D., Isakov A.Yu. (2018) Postsedimentary transformations of the Upper Devonian and Lower Carboniferous mudstones (the Middle Urals eastern slope). *Ekzolit-2018*. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 64-66. (In Russian)
- Mel'nychuk O.Yu., Ryanskaya A.D. (2017) Specific composition features of the Kodinka Formation mudstones (Upper Devonian, the Middle Urals eastern slope). *Litosfera*, **17**(3), 81-86. DOI: [10.24930/1681-9004-2017-3-071-086](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-3-071-086). (In Russian)
- Mil'ner G.B. (1968) *Petrografiya osadochnykh porod. T. II. Rukovodstvo po petrografii osadochnykh porod* [Sedimentary petrography. V. 2. Sedimentary petrography guidance]. Moscow, Nedra Publ., 594 p. (In Russian)
- Mizens G.A. (2000a) Revisiting geological history of the Southern Urals in the Middle Paleozoic. *Dokl. Akad. Nauk*, **371**(3), 356-357. (In Russian)
- Mizens G.A. (2000b) Late Devonian and Carboniferous sedimentary formations in the Southern Urals and problem of the continental segments collision. *Paleozony subduktitsii: tektonika, magmatizm, metamorfizm, sedimentogenez* [Subduction palaeozones: tectonics, magmatic activity, metamorphism, sedimentogenesis]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 65-84. (In Russian)
- Mizens G.A. (2002) *Sedimentatsionnye basseiny i geodinamicheskie obstanovki v pozdnem devone-rannei permi Yuga Urala* [Late Devonian–Early Permian deposition basins and geodynamic environments in the Southern Urals]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 190 p. (In Russian)
- Nichols G., Kusnana S., Hall R. (1991) Sandstones of arc and ophiolite provenance in backarc basin, Halmahera, eastern Indonesia. *Developments in sedimentary provenance studies*. Eds. A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **57**, 291-303. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.22>
- Nürnberg D., Levitan M.A., Pavlidis J.A., Shelekhova E.S. (1995) Distribution of clay minerals in surface sediments from the eastern Barents and southwestern Kara seas. *Geol. Rundschau*, **84**(3), 665-682. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00284528>
- Olli A.I. (1948) *Drevnie otlozheniya zapadnogo sklona Urala* [Ancient deposits of the Western Urals]. Saratov, SGU Publ., 407 p. (In Russian)

- Petschick R., Kuhn G., Gingele F.X. (1996) Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: Sources, transport, and relation to oceanography. *Mar. Geol.*, **130**(3-4), 203-229. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00148-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00148-4)
- Pettidzhon F.J. (1981) *Osadochnye porody* [Sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 751 p. (In Russian)
- Pettidzhon F.J., Potter P., Siver R. (1976) *Peski i peschani-ki* [Sand and sandstones]. Moscow, Mir Publ., 536 p. (In Russian)
- Preobrazhensky I.A., Sarkisyan S.G. (1954) *Mineraly osadochnykh porod* [Minerals of sedimentary rocks]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 462 p. (In Russian)
- Rateev M.A., Sadchikova T.A., Shabrova V.P. (2008) Clay minerals in recent sediments of the world ocean and relation to types of lithogenesis. *Lithol. Min. Res.*, **43**(2), 125-135. DOI: [10.1007/s10987-008-2003-5](https://doi.org/10.1007/s10987-008-2003-5)
- Rossak B., Kassens H., Lange H., Thiede J. (1999) Clay mineral distribution in surface sediments of the Laptev Sea: Indicator for sediment provinces, dynamics and sources. *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*. (Eds. H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede, L. Timokhov). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 587-599. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7_45
- Rudnik R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treat. Geochem.*, **3**, 1-64. DOI: [10.1016/B0-08-043751-6/03016-4](https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4)
- Sediment Provenance. Influences on Compositional Change from Source to Sink (2017) Ed. R. Mazumder. Elsevier, 2017, 600 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803386-9.00001-0>
- Selli R.C. (1989) *Drevnie obstanovki osadkonakopleniya* [Ancient sedimentary environments]. Moscow, Nedra Publ., 294 p. (In Russian)
- Shutov V.D. (1967) Sandstones classification. *Litol. Polez. Iskopaemye*, (5), 86-103. (In Russian)
- Shvanov V.N. (1987) *Petrografiya peschanykh porod (komponentnyi sostav, sistema, opisanie mineral'nykh vidov)* [Sandstones petrography (components, composition, system, mineral site describe)]. Leningrad, Nedra Publ., 269 p. (In Russian)
- Simanovich I.M. (1978) *Kvarts peschanykh porod* [Sandy rocks quartz]. Moscow, Nauka Publ., 154 p. (In Russian)
- Stratotip rifeya. Stratigrafiya. Geokhronologiya* [Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology]. (1983) (Eds. B.M. Keller, N.M. Chumakov). Moscow, Nauka Publ., 184 p. (In Russian)
- Sul'man A.M., Demchuk I.G. (1978) Clay minerals in the Riphean sedimentary deposits (Bashkirian meganticlinorium). *Dokembriiskie tolshchi Bashkirskogo megantiklinoriya na Urale i ikh metallogeniya* [Precambrian formations of the Baskirian meganticlinorium (the Southern Urals) and their metallogeny]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 16-24. (In Russian)
- Suttner L.J. (1974) Sedimentary petrographic provinces: an evaluation. *Paleogeographic Provinces and Provinciality, SEPM Spec. Publ.*, **21**, 75-84.
- Teilor S.R., MakLennan S.M. (1988) *Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust, its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian)
- Titov Yu.V. (2012) Revisiting sedimentary environments of the Lower Cretaceous sediments (БУ₁₈ reservoir, Pya-kyaha Formation, Bolshekhetskaya depression). *Geologiya v razvivayushchemsya mire: sb. nauch. tr. (po materialam Mezhdunar. konf. stud., asp. i molodykh uchennykh)* [Proc. of the intern. conf. "Geology in the developing world"]. Perm, Perm St. Univ. Publ., 347-350. (In Russian)
- Titov Yu.V., Shaihtudinova G.H., Astarkin S.V., Kolpakov V.V., Kozhevnikova N.V. (2019) Postsedimentary alteration of the Lower Cretaceous sediments (Western Siberia, Bolshekhetskaya depression). *Litosfera*, (1), 48-58. (In Russian)
- Tuchkova M.I. (1996) *Litologiya nizhne-sredneyurskikh otlozhenii Bol'shogo Kavkaza (na primere severnogo i yuzhnogo sklonov Tsentral'nogo Kavkaza)*. Avtoref. dis. ... kand. geol. min.-nauk [Lithology of the Lower-Middle Jurassic deposits in Greater Caucasus (on the example of Central Caucasus northern and southern slopes) Cand. geol. and min. sci. diss. author's abstract]. Moscow, GIN AN SSSR Publ., 24 p. (In Russian)
- Tuchkova M.I. (2007) Lithology of the Lower-Middle Jurassic deposits in Greater Caucasus (deposition, mineral composition, epigenetic transformations, palaeogeographic and geodynamic consequence). *Bol'shoi Kavkaz v al'piiskuyu epokhu* [Greater Caucasus in the Alpine epoch]. Moscow, GEOS Publ., 141-214. (In Russian)
- Van der Plas L., Tobi A.C. (1965) A chart for judging the reliability of point counting results. *Amer. J. Sci.*, **263**(1), 87-90. DOI: [10.2475/ajs.263.1.87](https://doi.org/10.2475/ajs.263.1.87)
- Veizer J., Jansen S.L. (1985) Basement and sediment recycling-2: Time dimension to global tectonics. *J. Geol.*, **93**(6), 625-643. DOI: [10.1086/628992](https://doi.org/10.1086/628992)
- Velbel M.A. (1980) Petrography of subduction zone sandstones. *J. Sed. Petrol.*, **50**(1), 303-304. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F79E1-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Vogt C., Knies J. (2008) Sediment dynamics in the Eurasian Arctic Ocean during the last deglaciation – The clay mineral group smectite perspective. *Mar. Geol.*, **250**(3-4), 211-222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.01.006>
- Vogt C., Knies J. (2009) Sediment pathways in the western Barents Sea inferred from clay mineral assemblages in surface sediments. *Norwegian J. Geol.*, **89**(1), 41-55.
- von Eynatten H. (2003) Petrography and chemistry of sandstones from the Swiss Molasse Basin: an archive of the Oligocene to Miocene evolution of the Central Alps. *Sedimentology*, **50**(4), 703-724. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00571.x>
- Wahsner M., Müller C., Stein R., Ivanov G., Levitan M., Shelekhova E., Tarasov G. (1999) Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways – A synthesis. *Boreas*, **28**(1), 215-233. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00216.x>
- Weltje G.J. (1994) Provenance and dispersal of sand-sized sediments: Reconstruction of dispersal patterns and sources of sand-sized sediments by means of inverse modeling techniques. Utrecht: Universiteit in Utrecht, Ser. Geol. Ultraiectina, 121, 208 p.
- Weltje G.J. (2002) Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology.

- Earth-Sci. Rew.*, **57**(3-4), 211-253. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00076-9)
- Willner A.P., Ermolaeva T., Stroink L., Glasmacher U.A., Giese U., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Walter R. (2001) Contrasting provenance signals in Riphean and Vendian sandstones in the SW Urals (Russia): constraints for a change from passive to active continental margin conditions in the Neoproterozoic. *Prec. Res.*, **110**, 215-239.
- Winkler A., Wolf-Welling T.C.W., Stattegger K., Thiede J. (2002) Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep-sea basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG). *Intern. J. Earth Sci.*, **91**(1), 133-148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s005310100199>
- Yapaskurt O.V. (2016) *Litologiya* [Lithology]. Moscow, Infra-M Publ., 359 p. (In Russian)
- Yuste A., Luzon A., Bauluz B. (2004) Provenance of Oligocene-Miocene alluvial and fluvial fans of the northern Ebro Basin (NE Spain): an XRD, petrographic and SEM study. *Sed. Geol.*, **172**(3-4), 251-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.10.001>
- Zhang K.-J., Zhang Y.-X., Xia B.-D., He Y.-B. (2006) Temporal variations of Mesozoic sandstone compositions in the Qiangtang block, Northern Tibet (China): implications for provenance and tectonic setting. *J. Sed. Res.*, **76**(8), 1035-1048. DOI: <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.089>
- Zuffa G.G. (1980) Hybrid arenites: their composition and classification. *J. Sed. Petrol.*, **50**(1), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F7950-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Zuffa G.G. (1985) Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. *Provenance of Arenites. NATO Asi Ser. (Ser. C)*, **148**. Ed. G.G. Zuffa. Dordrecht: Reidel Publ., 165-189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_8