

## Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 3. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (гранатов, турмалинов, хромшпинелидов, рутила и др.)

**Л. В. Бадида<sup>1</sup>, А. В. Маслов<sup>1,2</sup>, Г. А. Мизенс<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,  
e-mails: kokshina.lv@gmail.com, amas2004@mail.ru, mizens@igg.uran.ru*

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

Поступила в редакцию 13.03.2019 г., принята к печати 25.03.2019 г.

**Объект исследований.** Аксессорные минералы, присутствующие, в отличие от цирконов, в подавляющем большинстве обычных обломочных пород. **Материалы и методы.** В качестве материала, иллюстрирующего особенности применения различных методов и приемов, использованы данные о химическом составе минералов (гранатов, турмалинов, хромшпинелидов, рутила, хлоритоидов, клинопироксенов), выделенных из песчаников рифея и венд, а также верхней перми и нижнего триаса Южного Урала. Привлечены также многочисленные литературные примеры и данные. **Результаты.** Даётся обзор ряда современных методов изучения различных аксессорных минералов, которые позволяют существенно уточнить состав и особенности пород источников сноса для терригенных толщ. **Заключение.** Показана возможность использования ряда аксессорных минералов, имеющих наряду с цирконами значительный потенциал для получения важных данных о материнских породах.

**Ключевые слова:** песчаники, современные методы исследования обломочных минералов, рифей, венд, верхняя пермь, нижний триас, Южный Урал

### Благодарность

Авторы искренне признательны Н.С. Глушковой, выполнившей иллюстрации к данной статье.

*Исследования проведены в соответствии с темой № АААА-А18-118053090044-1 государственного задания ИГТ  
УрО РАН.*

### Provenance reconstructions.

## Article 3. Modern research methods for heavy detrital minerals (garnet, tourmaline, chromespinelide, rutile, chloritoid, pyroxene and amphibole)

**Lyudmila V. Badida<sup>1</sup>, Andrey V. Maslov<sup>1,2</sup>, Gunar A. Mizens<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st.,  
Ekaterinburg 620016, Russia, e-mails: kokshina.lv@gmail.com, amas2004@mail.ru, mizens@igg.uran.ru*  
<sup>2</sup>*Institute of Geology, Ufimian Federal Research Centre of RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa 450077, Russia*

Received 13.03.2019, accepted 25.03.2019

**Research subject.** This article considers accessory minerals, which, unlike zircons, are present in the vast majority of common clastic rocks. **Materials and methods.** The data on the chemical composition of minerals (garnet, tourmaline, chrome-spinelide, rutile, chloritoid and clinopyroxene) extracted from the Riphean and Vendian, as well as Upper Permian and Lower Triassic sandstones of the Southern Urals, were used to illustrate the features of applying various methods and techniques. In addition, numerous examples from publications are presented. **Results.** A number of modern methods for studying accessory minerals, which might be used to elucidate the composition and characteristics of the provenance rocks for terrigenous strata, were reviewed. **Conclusions.** It is shown that, similar to zircons, accessory minerals possess a significant potential in terms of providing important data on parent rocks.

**Keywords:** sandstones, modern research methods for detrital minerals, Riphean, Vendian, Upper Permian, Lower Triassic, Southern Urals

**Для цитирования:** Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 3. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (гранатов, турмалинов, хромшпинелидов, рутила и др.). *Литосфера*, 20(2), 149–167. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-149-167

**For citation:** Badida L.V., Maslov A.V., Mizens G.A. (2020) Provenance reconstructions. Article 3. Modern methods of detrital minerals' research (garnet, tourmaline, chrome-spinellid, rutile, chloritoid, pyroxene and amphibole). *Litosfera*, 20(2), 149–167. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-149-167

### Acknowledgments

The authors are sincerely grateful to N.S. Glushkova for completing the illustrations in this article.

*The studies were conducted in accordance with the theme No. AAAA-A18-118053090044-1 of the state assignment of the Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS.*

## ВВЕДЕНИЕ

Данная статья продолжает серию публикаций о современных методах и подходах к реконструкции состава пород питающих провинций. Первая статья была посвящена минералогопетрографическим методам расшифровки состава пород на палеоводосборах (Маслов и др., 2019), во второй рассмотрены лито- и изотопно-геохимические подходы, дающие возможность судить о присутствовавших на палеоводосборах комплексах пород по данным о валовом химическом составе (основные породообразующие оксиды, редкие и рассеянные элементы) песчаников и глинистых пород (Маслов и др., 2020). Настоящая публикация посвящена современным методам исследования таких обычных для терригенных пород обломочных минералов, как гранаты, турмалины, хромшпинелиды, рутил, хлоритоиды, пироксены и амфиболы.

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ

Как показывает практика конца XX – начала XXI в., для точной расшифровки состава пород источников сноса можно использовать сведения о химическом составе и кристаллохимических особенностях минералов тяжелой фракции песчаников, привлекая к этому различные петрогенетические диаграммы (Henry, Guidotti, 1985; Morton, 1991; Arai, 1992; Lenaz et al., 2000; Kamenetsky et al., 2001; Morton et al., 2004; Copjakova et al., 2005; Hegner et al., 2005; Faupl et al., 2006; Triebold et al., 2007; Meinhold et al., 2008, 2010; Hallsworth, Chisholm, 2008; Morton, Chenary, 2009; Meinhold, 2010; Kooijman et al., 2010; Henry et al., 2011; Kanouo et al., 2012; и др.).

Наш опыт подобной работы, полученный в результате исследования песчаников верхней перми и нижнего триаса южной части Предуральского прогиба, относительно невелик (Литогеохимия..., 2015; Мизенс и др., 2015), поэтому приводимая далее информация, относящаяся к упомянутым породам, в основном дублирует уже опубликованную. Однако все табличные данные о составе минералов, имеющиеся в работе (Литогеохимия..., 2015), здесь опущены.

**Гранаты.** Минералы группы граната являются обычными компонентами тяжелой фракции терригенных пород и рассматриваются чаще все-

го как свидетельство присутствия в областях размыва метаморфических образований и некоторых типов магматических пород (Mange, Maurer, 1991; von Eynatten, Gaupp, 1999). Благодаря значительной изменчивости химического состава данные об этих минералах широко используются при реконструкциях петрофонда (Morton, 1985, 1987; Haughton, Farrow, 1989; Tebbens et al., 1995; von Eynatten, Gaupp, 1999; Martínek, Štolfová, 2009). При этом следует иметь в виду, что состав гранатов в значительной степени зависит от парагенеза и химического состава существующих с ними минеральных фаз. Так, богатые железом гранаты обычно свойственны метаосадочным породам (в частности, гранат-слюдистым кристаллическим сланцам), испытавшим метаморфизм барроусского типа. Присутствие в обломочных породах гранатов с высоким (20–30%) содержанием Mg и Ca может указывать на размыв амфиболитов, голубых сланцев, ассоциирующих с эклогитами, или гранулитов (von Eynatten, Gaupp, 1999).

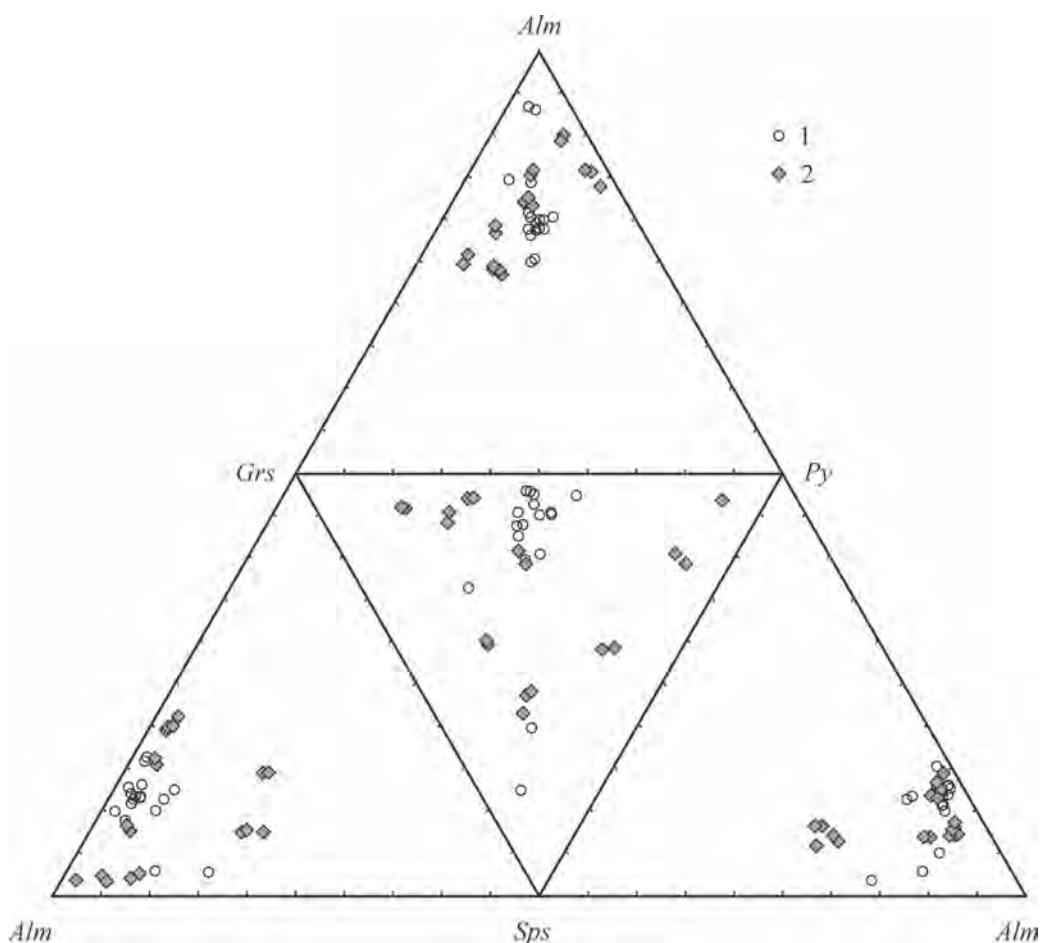
Существуют, однако, некоторые особенности рассматриваемых минералов, которые следует иметь в виду при изучении тяжелой фракции. Даже в пределах одной минеральной группы можно наблюдать сортировку индивидов по размерам и плотности, например, богатые альмандиновым миналом гранаты концентрируются в более мелких фракциях (Schuiling et al., 1985; Garzanti et al., 2008). Следовательно, различные тяжелые минеральные комплексы не обязательно означают, что они были получены из разных источников. Нужно учитывать также устойчивость гранатов, степень химического выветривания которых может зависеть от климата (см., например, Velbel, 2007; Andò et al., 2012 и ссылки в них). Гранаты относительно стабильны в условиях диагенеза, но в жарком влажном климате эти минералы разрушаются быстрее, чем роговая обманка, и их зерна могут полностью превращаться в глинистые комки (Garzanti et al., 2013).

В песчаниках верхней перми и нижнего триаса Предуральского прогиба присутствуют два типа гранатов. Первый – преимущественно розовые зерна, оттенки которых варьируют от желтого до насыщенного красноватого. Зерна этого типа сравнительно многочисленны. Среди них хорошо диагностируются две кристаллические формы: ромбодекаэдры и округлые кристаллы – тетрагонтриоктаэдры. Преобладающая часть зерен имеет размер порядка 0.2–0.3 мм. Второй тип (встречается реже)

характеризуется насыщенными красными, до вишневых, оттенками. В основном это обломки размером 0.1–0.2 мм. Исследование зерен первого типа на электронно-зондовом микронализаторе Cameca SX 100 (аналитик канд. геол.-мин. наук В.В. Хиллер, ИГГ УрО РАН) показало, что в целом кристаллы гомогенны, первичная зональность если и существует, то в пределах общей изменчивости состава.

Расчет гранатовых миналов (рис. 1) позволил сделать вывод, что гранаты в песчаниках татарского яруса преимущественно представлены альмандинами (альмандин – 50–72, пироп – 3–23, гроссуляр – 6–26, спессартин – 2–10%). Лишь в нескольких зернах спессартиновая компонента достига-

ет 17–28%. Гранаты из песчаников нижнего триаса в целом также относятся к альмандинам, но их состав более разнообразен (см. рис. 1): среди них выделяются зерна с увеличенной долей спессартина и гроссуляра. Содержание альмандинина в этих кристаллах составляет 36–71%, пиропа – 9–28, гроссуляра – 3–39, спессартина – 2–32%. На диаграмме А. Мортонса с соавторами (Morton et al., 2004; Mange, Morton, 2007; Meinholt et al., 2010) изученные гранаты тяготеют к полям В и Ви (рис. 2), которые объединяют минералы с низким содержанием Ca и высоким – Fe и соответствуют гранатам из метаосадочных пород, притерпевших амфиболитовую стадию метаморфизма (В), а также средним и кислым магматитам (Ви). Однако позднее А. Крип-

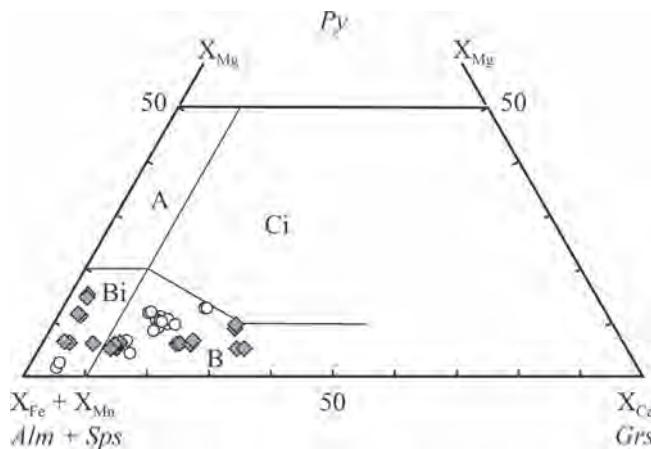


**Рис. 1.** Классификационный тетраэдр для гранатов (Copjakova et al., 2005) и положение на нем фигуративных точек состава обломочных гранатов из песчаников молассовой формации Бельской впадины Предуральского прогиба.

Миналы: *Alm* – альмандин, *Grs* – гроссуляр, *Py* – пироп, *Sps* – спессартин. Песчаники: 1 – татарского яруса верхней перми, 2 – нижнего триаса.

**Fig. 1.** Detrital garnet compositions from molasse sandstones of the Belskaya depression, the Pre-Uralian foredeep illustrated in garnet classification tetrahedron (Copjakova et al., 2005).

Minaly: *Alm* – Almandine, *Grs* – Grossular, *Py* – Pyrope, *Sps* – Spessartine. Sandstones: 1 – Tatar Stage, Upper Permian; 2 – Lower Triassic.



**Рис. 2.** Фрагмент диаграммы распределения гранатов с полюсами пироп–альмандин со спессартин–гроссуляром (Mange, Morton, 2007), а также положение на ней гранатов из песчаников молассовой формации Предуральского прогиба.

А – в основном метаосадки гранулитовой фации или чарнокиты и средние-кислые магматические породы, В – метаосадочные породы амфиболитовой фации, Bi – средние-кислые магматиты, Ci – основные магматиты. Остальные обозначения – см. рис. 1.

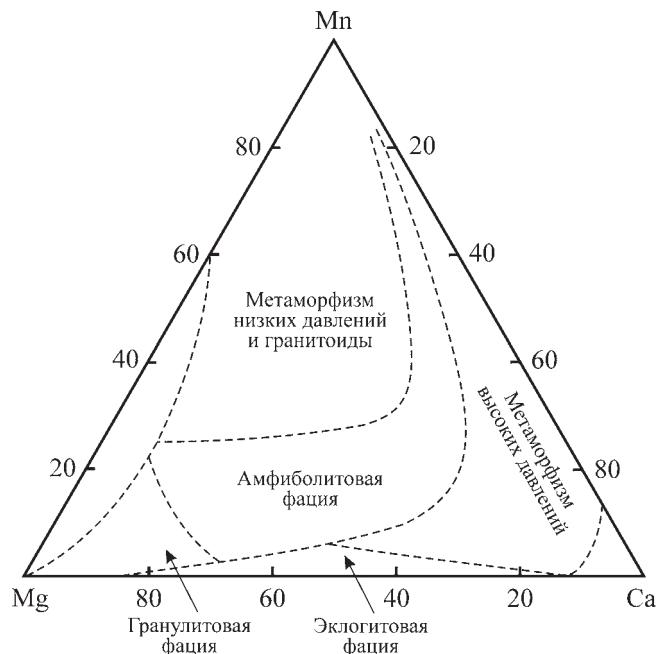
**Fig. 2.** Fragment of the ternary discrimination diagram with molecular proportions of pyrope–almandine plus spessartine–grossular as poles (Mange, Morton, 2007), and the position on it detrital garnets from the molasse sandstones of the Pre-Uralian foredeep.

A – mainly the metasediments from high-grade granulite-facies or charnockites and intermediate to felsic igneous rocks, B – amphibolite-facies metasedimentary rocks, Bi – intermediate to felsic igneous rocks, Ci – mafic rocks. Other symbols – see Fig. 1.

пнер с соавторами (Krippner et al., 2014) на значительном фактическом материале показали, что поле Bi также существенно заполняют минералы пород амфиболитовой фации.

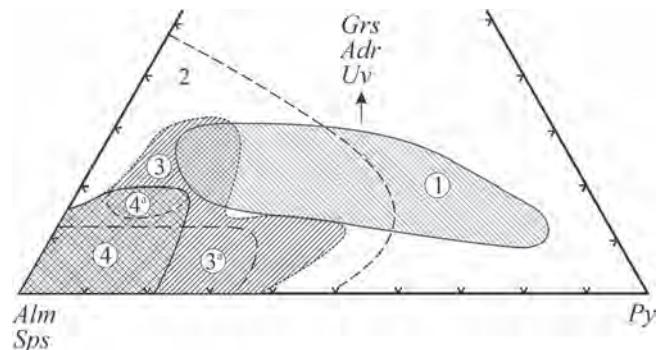
По данным (Teraoka, 2003; Малиновский и др., 2006), установить взаимосвязь обломочных гранатов с различными типами метаморфических пород можно с помощью диаграммы Mg–Mn–Ca (рис. 3). В то же время исследование 3500 зерен гранатов различного генезиса (Krippner et al., 2014) показало низкую воспроизводимость результатов, полученных с помощью указанной диаграммы, не учитывая содержание в гранатах Fe.

Кроме перечисленных петрогенетических диаграмм для гранатов существуют обзорная диаграмма Н.В. Соболева для пироп–альмандинового ряда из разных фаций метаморфизма (Соболев, 1964) (рис. 4), классификационная диаграмма В. Райта (с вершинами пироп–альмандин со спессартин–гроссуляром) (Wright, 1938) (рис. 5) и двойная диаграмма Р. Авбрехта (с аналогичными вершинами, но разложенными на два треугольника) (Aubrecht et



**Рис. 3.** Треугольная диаграмма распределения для гранатов с вершинами Mg–Mn–Ca (Teraoka, 2003).

**Fig. 3.** Ternary discrimination diagram with Mg–Mn–Ca as poles (Teraoka, 2003).



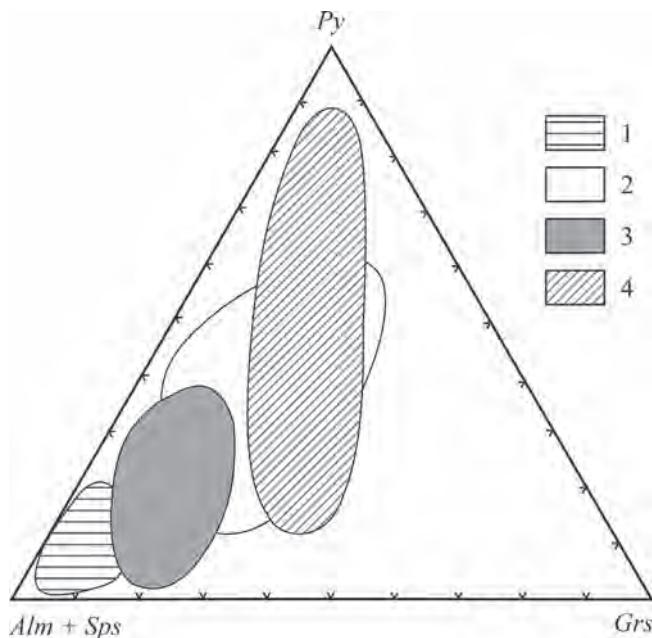
**Рис. 4.** Диаграмма распределения для гранатов из разных фаций метаморфизма.

Фации: 1 – эклогитовая, 2 – гранулитовая, 3 – амфиболитовая (3<sup>a</sup> – биотитовых гнейсов и гранитов), 4 – горовиковая (4<sup>a</sup> – из кислых эфузивов) (Соболев, 1964). Alm – альмандин, Adr – андрадит, Grs – гроссуляр, Py – пироп, Sps – спессартин, Uv – уваровит.

**Fig. 4.** Discrimination diagram for garnet from different metamorphic facies.

Facies: 1 – eclogite, 2 – granulite, 3 – amphibolite (3<sup>a</sup> – biotite gneiss and granites), 4 – hornfels (4<sup>a</sup> – from acid effusive) (Sobolev, 1964).

Alm – almandine, Adr – andradite, Grs – grossular, Py – pyrope, Sps – spessartine, Uv – uvarovite.



**Рис. 5.** Диаграмма распределения для гранатов с вершинами пироп–альмандин со спессартин–гроссуляр (Wright, 1938).

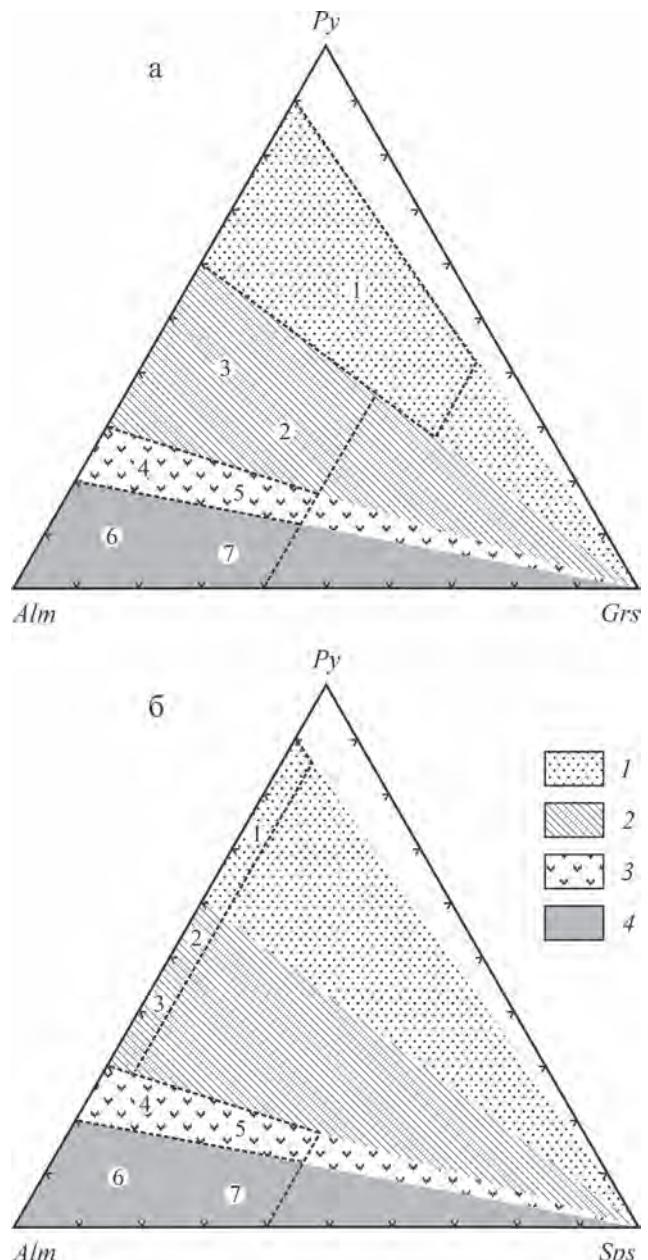
1 – граниты и гранитные пегматиты, 2 – амфиболиты, 3 – биотитовые сланцы, 4 – эклогиты.

**Fig. 5.** Discrimination diagram for garnet with poles pyrope–almandine plus spessartine–grossular (Wright, 1938).

1 – granites and granite pegmatites, 2 – amphibolites, 3 – biotite schists, 4 – eclogites.

al., 2009) (рис. 6). Все диаграммы имеют как положительные стороны, так и недочеты, и поля перекрытия, поэтому к изучению тяжелой фракции необходимо подходить комплексно.

**Турмалины**, как и гранаты, являются одними из самых обычных аксессорных минералов терригенных пород. Они весьма устойчивы как к химическому, так и к механическому выветриванию (Nascimento et al., 2007; и др.) и свойственны для широкого спектра материнских образований. Как и гранаты, они характеризуются значительными вариациями химического состава (Ertl, 2009; и др.), что позволяет использовать их в качестве важного инструмента для реконструкции состава пород-источников обломочного материала (Henry, Dutrow, 1992; von Eynatten, Gaupp, 1999; Viator, 2003; Dutrow, Henry, 2011; Kowal-Linka, Stawikowski, 2013; Salata, 2014; Vd'ačný, Bačík, 2015). Считается, что турмалины с высокими содержаниями Al, Li и Fe встречаются в гранитоидах и пегматитах, тогда как минералы с заметными концентрациями Mg более свойственны метаосадочным и метасоматическим породам. Для использования турмалинов в качестве индикаторов состава пород-источников



**Рис. 6.** Диаграмма распределения для гранатов с вершинами пироп–альмандин–гроссуляр (а) и пироп–альмандин–спессартин (б) (Aubrecht et al., 2009).

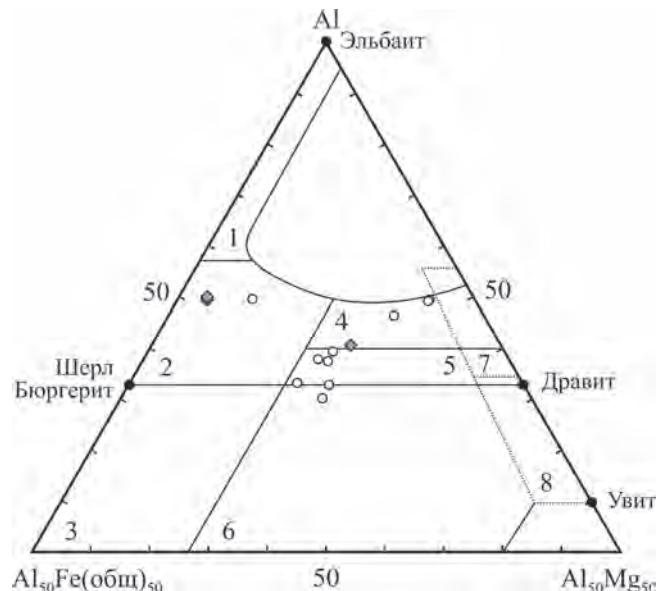
1 – гранаты из высокобарических и ультрабарических пород; 2 – породы эклогитовой и гранулитовой фации; 3, 4 – породы амфиболитовой фации: 3 – верхи амфиболитовой до гранулитовой фации, 4 – породы амфиболитовой фации, включающей гранаты из голубых сланцев, скарнов, серпентинитов и магматических пород. Более дробное деление предполагает семь групп: 1 – ультрабарические эклогиты или перидотиты; 2 – высокобарические эклогиты и высокобарические гранулиты; 3 – кислые и средние гранулиты; 4 – гнейсы, сформировавшиеся на рубеже гранулитовой и амфиболитовой фаций; 5 – амфиболиты, сформировавшиеся на рубеже гранулитовой и амфиболитовой фаций; 6 – гнейсы амфиболитовой фации; 7 – амфиболиты амфиболитовой фации.

**Fig. 6.** Discrimination diagram with *pyrope–almandine–grossular* compositions (a), *pyrope–almandine–spessartine* compositions (b) as poles (Aubrecht et al., 2009).

1 – garnets from high-pressure to ultrahigh-pressure rocks; 2 – eclogite- and granulite-facies rocks; 3, 4 – amphibolite-facies rocks: 3 – higher amphibolite – to granulite-facies rocks, 4 – amphibolite facies rocks also includes garnets from blueschists, skarns, serpentinites and igneous rocks. More fractional division includes 7 groups: 1 – ultrahigh-pressure eclogites or peridotites; 2 – high-pressure eclogites and high-pressure granulites; 3 – felsic and intermediate granulites; 4 – gneisses metamorphosed under conditions transitional to granulite- and amphibolite-facies; 5 – amphibolites metamorphosed under conditions transitional to granulite- and amphibolite-facies; 6 – gneisses metamorphosed under amphibolite-facies conditions; 7 – amphibolites metamorphosed under amphibolite-facies conditions.

обломочного материала предложен ряд диаграмм, таких, как  $\text{Al}_{100}\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}\text{Al}_{50}$  и  $\text{Ca}–\text{Fe}_{\text{общ}}–\text{Mg}$  (Henry, Guidotti, 1985; Vd'ačný, Bačík, 2015), диаграмма Ca–X-site vacancy (Henry, Dutrow, 1996) и др. В последние годы при установлении материнских для обломочного турмалина пород находит применение и метод лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy LIBS) (Farnsworth-Pinkerton et al., 2018; и др.).

В песчаниках татарского яруса и нижнего триаса Бельской впадины Предуральского прогиба турмалины присутствуют в основном в виде столбчатых, призматических кристаллов, тригональных, реже псевдогексагональных. Крупные индивиды хорошо окатаны, а мелкие сохранили не только форму, но и характерную штриховку на гранях призмы, параллельную удлинению. Хорошо просматривается отдельность, поперечная удлинению кристаллов. Окраска неравномерная, зональная; зоны подчеркиваются как густотой окраски, так и оттенками цвета. Размер зерен преимущественно не превышает 0.1–0.2 мм. Количество турмалина в песчаниках не постоянно. Химический состав минерала, выделенного из рассматриваемых песчаников, различается незначительно. При этом почти для всех зерен характерно высокое содержание Fe (от 6 до 11%). На диаграмме  $\text{Al}_{100}\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}\text{Al}_{50}$  (Henry, Guidotti, 1985) точки состава исследованных зерен сосредоточены в основном в поле турмалинов из метапелитов и метапсаммитов (рис. 7). На диаграмме  $\text{Ca}–\text{Fe}_{\text{общ}}–\text{Mg}$  (Henry, Guidotti, 1985) фигуративные точки локализованы в поле бедных Ca метапелитов и метапсаммитов (рис. 8), т. е. согласуются с данными, полученными при использовании первой диаграммы. Вытекающий из анализа химического состава обломочных зерен турмалина вывод о поступлении их в осадок за счет размыва метаморфических пород выглядит достаточно убедительно, так как в каркасе песчаников и верхней перми, и нижнего триаса южных впадин Предуральского проги-



**Рис. 7.** Диаграмма  $\text{Al}–\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}–\text{Mg}_{50}\text{Al}_{50}$  (Henry, Guidotti, 1985) и локализация на ней точек состава обломочных турмалинов из песчаников татарского яруса и нижнего триаса южной части Предуральского прогиба.

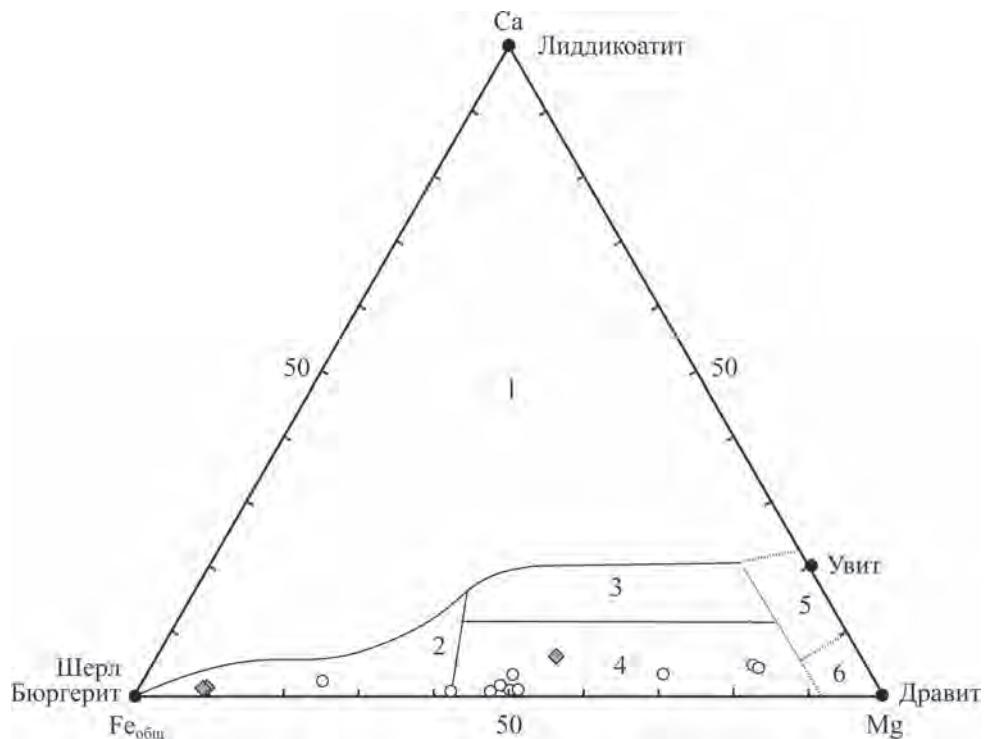
1 – богатые Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 2 – бедные Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 3 – богатые Fe кварцтурмалиновые породы и гидротермально-измененные граниты; 4 – метапелиты и метапсаммиты, насыщенные глиниоземом; 5 – метапелиты и метапсаммиты, бедные глиниоземом; 6 – богатые Fe кварцтурмалиновые породы, метапелиты и известково-силикатный роговик; 7 – ультрамафиты, низкокальциевые и богатые Cr и V метаосадки; 8 – метакарбонаты, метапироксениты. Остальные обозначения – см. рис. 1.

**Fig. 7.** Detrital tourmaline compositions of the sandstones from the Tatar Stage and the Lower Triassic, southern part of the Pre-Uralian foredeep illustrated in the  $\text{Al}–\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}–\text{Mg}_{50}\text{Al}_{50}$  plot for tourmaline (Henry, Guidotti, 1985).

1 – Li-rich granitoids in association with aplites and pegmatites; 2 – poor Li granitoids in association with aplites and pegmatites; 3 – Fe-rich quartz-tourmaline rocks and hydrothermally modified granites; 4 – metapelites and metapsammites, saturated with alumina; 5 – metapelites and metapsammites, poor in alumina; 6 – Fe-rich quartz-tourmaline rocks, metapelites and calc-silicate hornfels; 7 – ultramafic rocks, low Ca, and rich Cr and V metasedimentary rocks; 8 – metacarbonates, metapyroxenites. Other symbols – see Fig. 1.

ба существенную роль играют кварциты и кварцитовидные песчаники (Литогеохимия..., 2015).

**Хромшипелиды.** Минералы этой группы также широко распространены в обломочных породах, но в значительных количествах проявлены лишь в районах распространения габбро-перидотитов, где хромовая шпинель часто составляет основную часть тяжелой фракции. В условиях выветривания



**Рис. 8.** Диаграмма Ca–Fe<sub>общ</sub>–Mg (Henry, Guidotti, 1985) и расположение на ней точек состава обломочных туровмалинов из песчаников татарского яруса и нижнего триаса Бельской впадины Предуральского прогиба.

1 – богатые Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 2 – бедные Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 3 – богатые Ca метапелиты и метапсаммиты; 4 – бедные Ca метапелиты, метапсаммиты и кварцтуровмалиновые породы; 5 – метакарбонаты; 6 – метаультрамафиты.  
Остальные обозначения – см. рис. 1.

**Fig. 8.** Detrital tourmaline compositions from the Tatar Stage and the Lower Triassic sandstones, the Bel'skaya depression of the Pre-Uralian foredeep illustrated in the Ca–F<sub>tot</sub>–Mg diagram for tourmaline (Henry, Guidotti, 1985).

1 – Li-rich granitoids in association with aplites and pegmatites; 2 – poor Li granitoids in association with aplites and pegmatites; 3 – Ca-rich metapelites and metapsammites; 4 – poor Ca metapelites, metapsammites and quartz-tourmaline rocks; 5 – metacarbonates; 6 – metaultramafites.

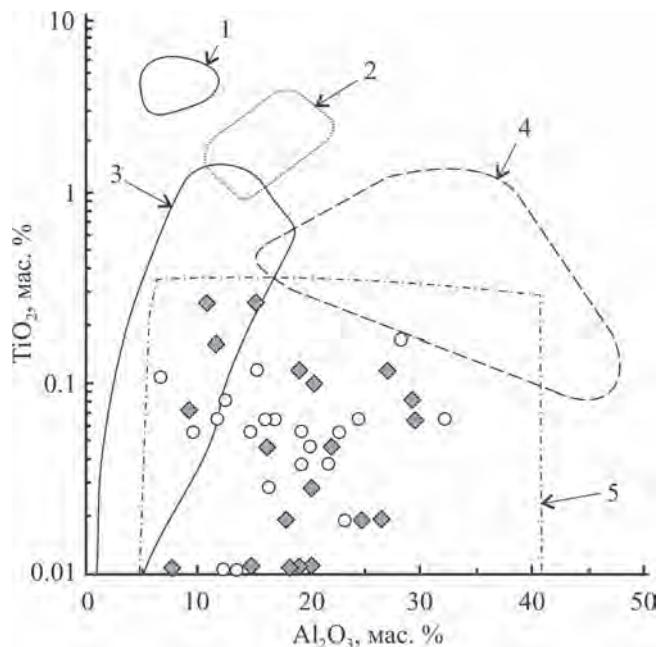
Other symbols – see Fig. 1.

и при транспортировке хромовые шпинели весьма устойчивы. Для расшифровки источников этих минералов в осадочных породах в мировой практике широко используются диаграммы, основанные на отношениях главных и второстепенных оксидов, например  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ – $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ – $\text{TiO}_2$  и др. (Arai, 1992; Lenaz et al., 2000; Kamenetsky et al., 2001; Hegner et al., 2005; Faupl et al., 2006; Малиновский и др., 2006; Aubrecht et al., 2009; и др.).

В песчаниках Предуральского прогиба хромшпинелиды присутствуют в виде многочисленных октаэдрических кристаллов, нередко с округленными вершинами (за счет усложнения плохо развитыми гранями), и неокатанных осколков с раковистым изломом. Они характеризуются железо-черным цветом и металлическим блеском. Размер зерен варьирует от 0.7–0.8 мм (редко) до 0.2–0.3 мм и меньше. Химический состав хромшпине-

лидов в песчаниках разного возраста практически не различается. В зависимости от содержания главных и второстепенных компонентов среди хромшпинелидов в исследованных нами песчаниках выделяются алюмохромиты (наиболее распространенные) и хромпикотиты (редкие). В песчаниках верхней перми содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в хромшпинелидах варьирует от 6.61 до 32.17,  $\text{FeO}_{общ}$  – от 11.95 до 20.59 и  $\text{MgO}$  – от 7.12 до 14.25%. Содержания этих же оксидов в хромшпинелидах из песчаников нижнего триаса составляют соответственно 7.63–29.44, 13.28–25.69 и 7.77–14.30%. Обычно в качестве примеси присутствуют также Ti (содержание в оксидной форме до 0.30),  $\text{Ni}_2\text{O}$  (до 0.15),  $\text{ZnO}$  (до 0.30) и  $\text{MnO}$  (до 0.30%). В отдельных зернах в песчаниках татарского яруса содержание  $\text{ZnO}$  поднимается до 0.81,  $\text{MnO}$  – до 1.17%.

На диаграмме  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{TiO}_2$  (Kamenetsky et al., 2001) фигурационные точки хромшпинелидов из



**Рис. 9.** Диаграмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  (Kamenetsky et al., 2001) и распределение на ней точек состава хромшпинелидов из песчаников молассовой формации Бельской впадины Предуральского прогиба.

Поля хромшпинелидов: 1 – из крупных магматических провинций, 2 – из базальтов океанических островов, 3 – из островных дуг, 4 – из базальтов срединно-океанических хребтов, 5 – из надсубдукционных зон. Остальные обозначения – см. рис. 1.

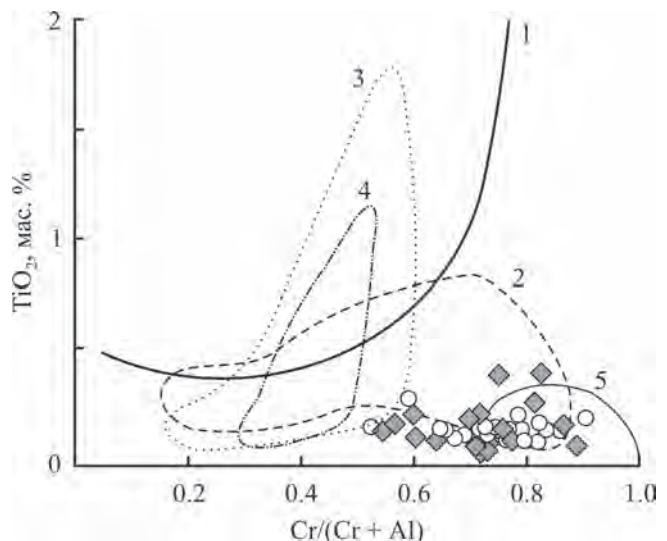
**Fig. 9.** The  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  plot (Kamenetsky et al., 2001) and the distribution on it chromespinelid compositions from molasse sandstone, the Bel'skaya depression of the Pre-Uralian foredeep.

Fields of the chromospinelids from the rocks of: 1 – large igneous provinces, 2 – basalts of oceanic islands, 3 – island arcs, 4 – basalts of the mid-ocean ridges, 5 – subduction zones.

Other symbols – see Fig. 1.

рассматриваемых песчаников попадают в поле надсубдукционных зон и островных дуг (рис. 9). На диаграммах  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ - $\text{TiO}_2$  (Hegner et al., 2005) (рис. 10) и  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ - $\text{TiO}_2$  (Arai, 1992) (рис. 11) они концентрируются в полях пород, также связанных с островными дугами. Из сказанного можно сделать вывод, что источниками хромшпинелидов, присутствующих в верхнепермско-нижнетриасовых псаммитах Бельской впадины Предуральского прогиба, были блоки океанических и субокеанических базальтов и пород ультраосновного состава.

Кроме перечисленных при установлении материнских пород для хромшпинелидов могут быть использованы также диаграммы  $\text{Cr}^{3+}$ - $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Al}^{3+}$  (Cookenboo et al., 1997) (рис. 12),  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ - $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Cr} + \text{Al})$  и  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ - $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  (Irvine, 1974; Dick, Bullen, 1984; Cookenboo et al.,



**Рис. 10.** Диаграмма  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ - $\text{TiO}_2$  (Hegner et al., 2005) и положение на ней точек состава хромшпинелидов из песчаников молассовой формации Бельской впадины Предуральского прогиба.

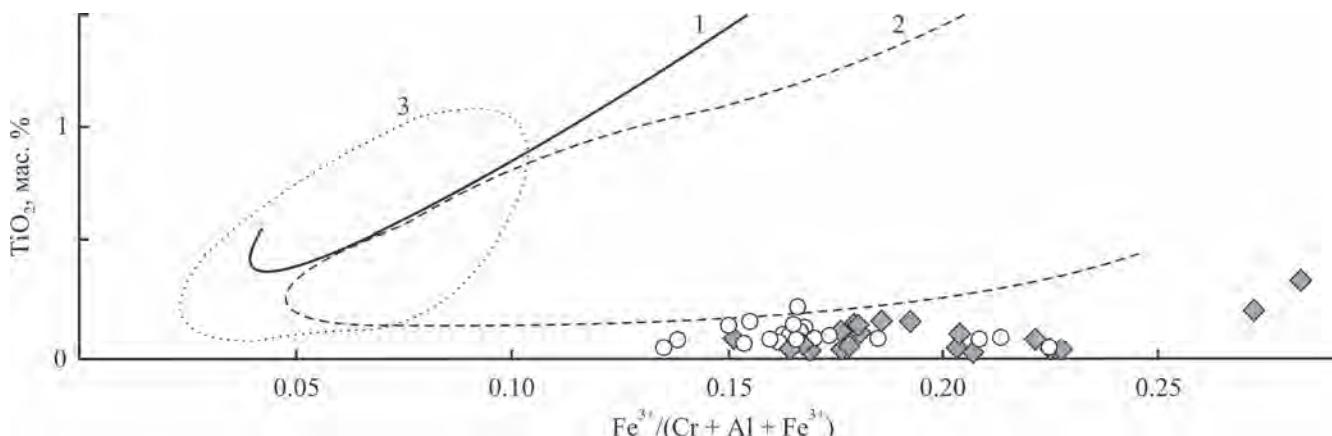
Здесь и на рис. 11 поля хромшпинелидов: 1 – из внутриплитных базальтов, 2 – из островных дуг, 3 – из базальтов срединно-океанических хребтов, 4 – из задуговых зон, 5 – из бонинитовых островодужных серий. Остальные обозначения – см. рис. 1.

**Fig. 10.** The  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ - $\text{TiO}_2$  plot (Hegner et al., 2005) and the position on it of the points of chromespinelis from the Tatar Stage and the Lower Triassic sandstones, the Bel'skaya depression of the Pre-Uralian foredeep.

Here and in Fig. 11 are the fields of chromespinelis from: 1 – intra-plate basalts, 2 – island arc's rocks, 3 – basalts of the mid-ocean ridges, 4 – rocks of back-arc zones, 5 – rocks of the boninite island arc series. Other symbols – see Fig. 1.

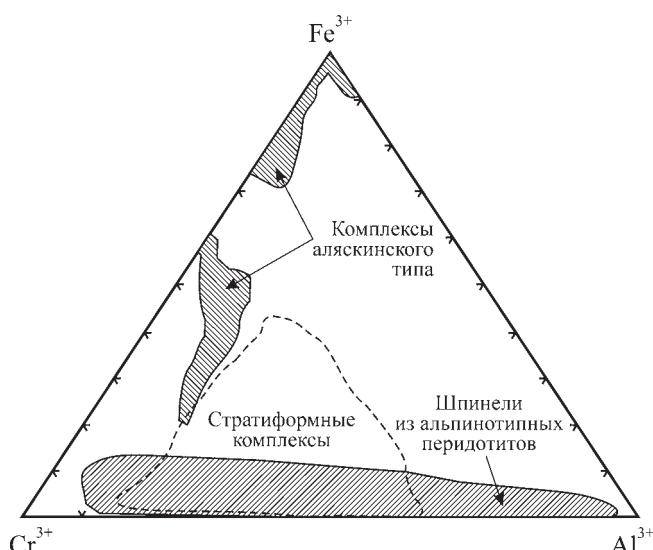
1997) (рис. 13) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Щука, Вржосек, 1983) (рис. 14).

По представлениям (Force, 1980), основное количество обломочного **рутilla** поступает в осадочные породы за счет эрозии высокометаморфизованных пород. Все остальные рутилодержащие образования (щелочные изверженные, гидротермально-измененные породы, пегматиты, метаморфические породы низких ступеней) могут быть, по всей видимости, только локальными/точечными источниками этого минерала. Авторами публикации (Zack et al., 2004б) показано, что для разграничения рутилов из метапелитов и метаморфизованных основных магматических пород могут быть использованы концентрации в них Cr и Nb (рис. 15а): рутил из метапелитов содержит порядка 900–2700 г/т Nb, тогда как содержание Cr существенно ниже указанных значений. По представлениям (Meinhold et al., 2008), наименьшее содержание Nb в рутиле из ме-



**Рис. 11.** Диаграмма  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ – $\text{TiO}_2$  (Arai, 1992) и положение на ней фигуративных точек состава зерен хромшпинелидов из песчаников татарского яруса и нижнего триаса Бельской впадины Предуральского прогиба.

**Fig. 11.** The  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ – $\text{TiO}_2$  diagram (Arai, 1992) and the position on it of the data points of chromespinellid's grains from the Tatar Stage and the Lower Triassic sandstones, the Bel'skaya depression of the Pre-Uralian foredeep.



**Рис. 12.** Треугольная диаграмма главных трехвалентных катионов  $\text{Cr}^{3+}$ – $\text{Fe}^{3+}$ – $\text{Al}^{3+}$  в хромовых шпинелях (Cookenboo et al., 1997).

**Fig. 12.** Ternary plot of the major trivalent cations  $\text{Cr}^{3+}$ – $\text{Fe}^{3+}$ – $\text{Al}^{3+}$  in chromian spinels (Cookenboo et al., 1997).

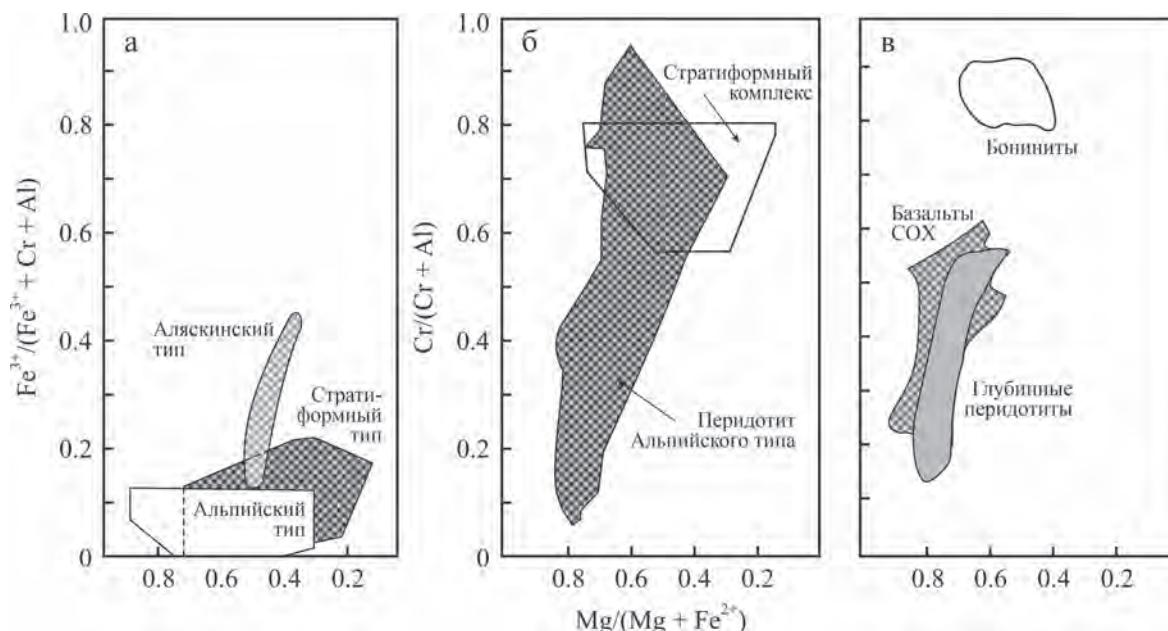
тапелитов может быть и 800 г/т. Предполагается, что рутил с преобладанием Cr над Nb или рутил, в котором содержание Cr меньше, чем Nb, а концентрация Nb, в свою очередь, меньше 800 г/т, формировался в метаморфизованных основных магматических породах. В работе (Triebold et al., 2007) для разграничения рутила из различных материнских пород предложен параметр  $\log(\text{Cr}/\text{Nb})$  (рис. 15б), а в публикации (Zack et al., 2004а) обосновывается вы-

вод, что в рутиле из метаморфических пород содержание Fe в основном выше 1000 г/т. В этих же целях, как показано в работе (Rosel et al., 2018), можно применять и диаграмму  $\text{U}-\text{Zr}/50-(\text{Cr} + 2500)/\text{Nb}$ , где U – это концентрация урана, Zr/50 – термобарометр Zr – в рутиле (Tomkins et al., 2007), а  $(\text{Cr} + 2500)/\text{Nb}$  – уравнение определения типа источника по (Triebold et al., 2012).

Примеры использования данных по химическому составу обломочного рутила для реконструкции состава пород в источниках сноса можно найти в (Stendal et al., 2006; Triebold et al., 2007; Morton, Chereny, 2009; Rozendaal et al., 2009; Meinholt, 2010; Meinholt et al., 2011; Okay et al., 2011; Kooijman et al., 2012; Triebold et al., 2012; Újvári et al., 2013; Nemec, Huraiová, 2018; и др.). В этих же целях используются результаты определения U-Pb-изотопных возрастов обломочного рутила (Allen, Campbell, 2007; Meinholt et al., 2011; Rosel et al., 2011, 2014, 2018; Kooijman et al., 2012; Small et al., 2013; Avigad et al., 2017; и др.).

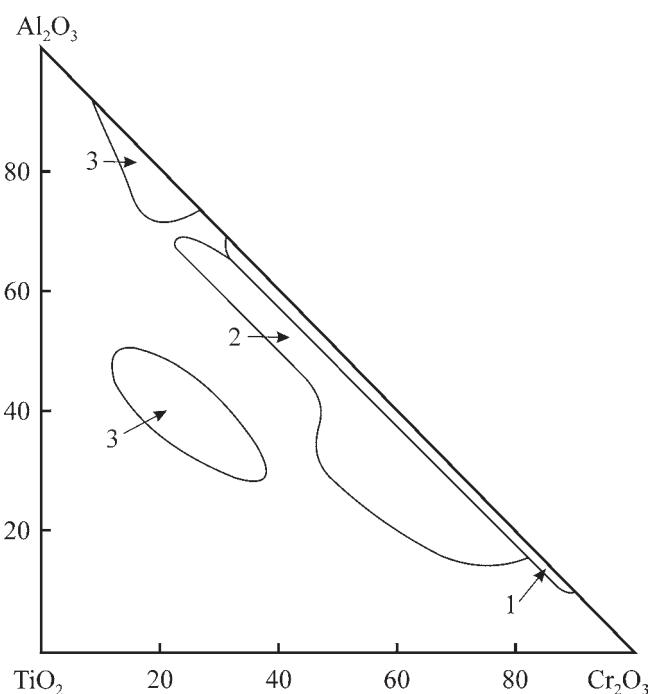
В песчаниках зилаирской свиты верхнего девона рутил присутствует преимущественно в виде столбчатых, призматических кристаллов, хорошо окатанных. Окраска характерная, красноватобурая, с сильным металлическим блеском. Размер зерен в основном не превышает 0.1 мм. На диаграмме отношения Cr к Nb (созданной (Zack et al., 2004б), с добавленной границей  $\log(\text{Cr}/\text{Nb}) = 0$  (Triebold et al., 2005)) зилаирский рутил кучно попадает в поле рутила из метапелитовых пород (рис. 16).

**Хлоритоид** является обычным минералом метапелитов низкой и средней стадий метаморфизма (Morton, 1991; von Eynatten, Gaupp, 1999; и др.).



**Рис. 13.** Дискриминантные диаграммы  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})-\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Cr} + \text{Al})$  (а) и  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})-\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  (б, в) для хромовых шпинелей (Irvine, 1974; Dick, Bullen, 1984).

**Fig. 13.** Chromian spinels' discrimination plots  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})-\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Cr} + \text{Al})$  (a) and  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})-\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  (б, в) (Irvine, 1974; Dick, Bullen, 1984).



**Рис. 14.** Диаграмма  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$  для магматических шпинелей.

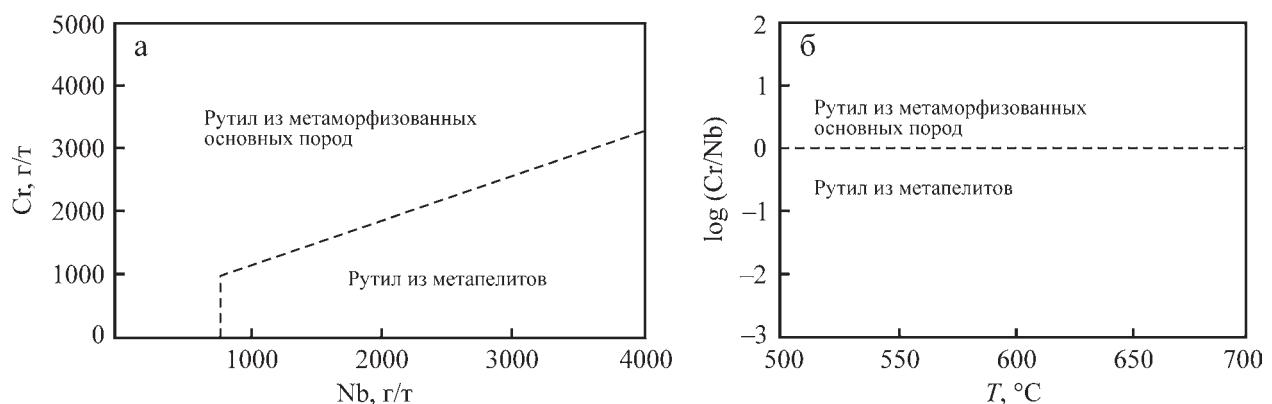
Поля составов шпинелей: 1 – из альпинотипных гипербазитов, 2 – из базальтоидных гипербазитов и базальтов, 3 – из лерцолитовых включений в щелочных базальтах и кимберлитах (Щука, Вржосек, 1983).

**Fig. 14.** The diagram  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$  for magmatic spinel.

Fields of spinel compositions: 1 – from alpine-type hyperbasites, 2 – from basaltic hyperbasites and basalts, 3 – from lherzolite inclusions in alkaline basalts and kimberlites (Shchuka, Vrzosek, 1983).

Его устойчивость к внешним воздействиям в осадочном цикле сопоставима с таковой граната (Morton, 1985; Mange, Maurer, 1991; von Eynatten, Gaupp, 1999). Изменчивость химического состава хлоритоидов определяется вариациями содержаний в них таких элементов, как Fe, Mg и Mn (Morton, 1991). Хлоритоиды метапелитов барроусского типа низких и средних давлений обычно обогащены Fe и Mn, а хлоритоиды из метапелитов фации голубых сланцев содержат повышенное количество Fe и Mg (Chopin, Schreyer, 1983). По представлениям (Chopin, 1983), хлоритоиды с содержанием Mg более 50 мол. % указывают на формирование вмещающих их пород при давлении от 15 до 18 кбар. Для разграничения хлоритоидов, с одной стороны, из пород низких и средних степеней метаморфизма, а с другой – из пород высокобарических фаций (фации голубых сланцев) чаще всего применяется диаграмма Mg–Mn–Fe (Chopin, Schreyer, 1983; von Eynatten, Gaupp, 1999; и др.) (рис. 17).

По химическому составу **клинопироксенов** и **амфиболов** с помощью различных диаграмм могут

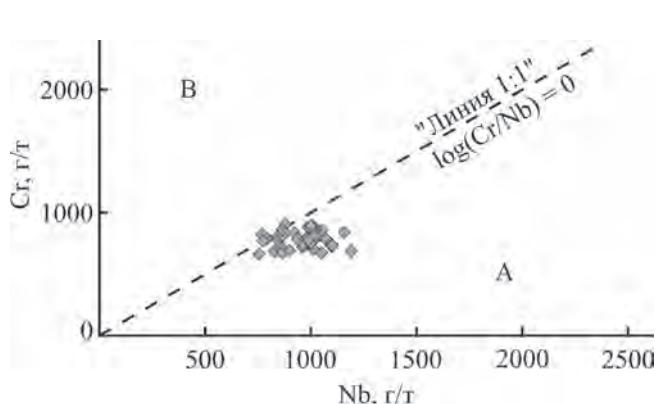


**Рис. 15.** Дискриминантные диаграммы для рутила из различных метаморфических пород.

а – диаграмма Nb–Cr (Zack et al., 2004б), б –  $\log(\text{Cr}/\text{Nb})$ – $T$  (термобарометр, рассчитанный по Zr) (Triebold et al., 2007).

**Fig. 15.** Discrimination plots for rutile from different metamorphic lithologies.

а – plot Nb–Cr after (Zack et al., 2004б), б – plot of temperatures calculated Zr-in-rutile versus  $\log(\text{Cr}/\text{Nb})$  after (Triebold et al., 2007).



**Рис. 16.** Диаграмма Nb–Cr для дегритового рутила.

Поля для метаморфического рутила: А – из метапелитовых, В – из мafических пород (Zack et al., 2004б; Triebold et al., 2005).

**Fig. 16.** Plot of Nb vs. Cr contents of detrital rutile.

The fields for rutile derived from metapelitic (A) and mafic rocks (B) (Zack et al., 2004b; Triebold et al., 2005).



**Рис. 17.** Дискриминантная диаграмма хлоритоидов на основе их химического состава Mg–Mn–Fe (Chopin, Schreyer, 1983).

**Fig. 17.** Discrimination plot of chloritoids based on their chemical composition Mg–Mn–Fe (Chopin, Schreyer, 1983).

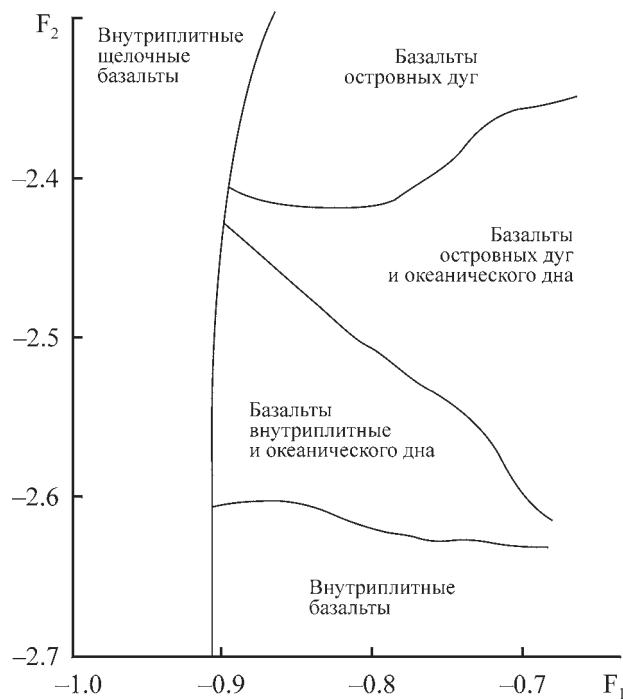
быть реконструированы типы вулканических источников питания (вулканические породы островных дуг, метаморфические и интрузивные породы энсигматических островных дуг, внутриплитные базальты и т. п.), что хорошо продемонстрировано на примере ряда объектов, в том числе по терригенным породам различных палеобассейнов орогенных областей востока Азии (Krawinkel et al., 1999; Малиновский и др., 2006). По данным (Малиновский и др., 2006), для реконструкции пород-источников клинопироксенов могут быть использованы дискриминационная диаграмма  $F_1$ – $F_2$ , предложенная в работе (Nisbet, Pearce, 1977) (рис. 18), диаграммы (Ca + Na)–

Ti, Ca–(Ti + Cr), Al–Ti<sup>1</sup> (Leterrier et al., 1982) (рис. 19) и MnO–TiO<sub>2</sub>–Na<sub>2</sub>O (Nisbet, Pearce, 1977), для амфиболов в этих же целях применяется диаграмма Al–Fe–Ti × 10 (Nechaev, 1991) (рис. 20).

## ВЫВОДЫ

Современная литология широко использует химический состав и кристаллохимические особенности минералов тяжелой фракции для установления

<sup>1</sup> Все элементы в перечисленных диаграммах даны в формульных единицах.



**Рис. 18.** График дискриминантных функций  $F_1$  и  $F_2$  для анализа пироксена из главных магматических типов лав (Nisbet, Pearce, 1977).

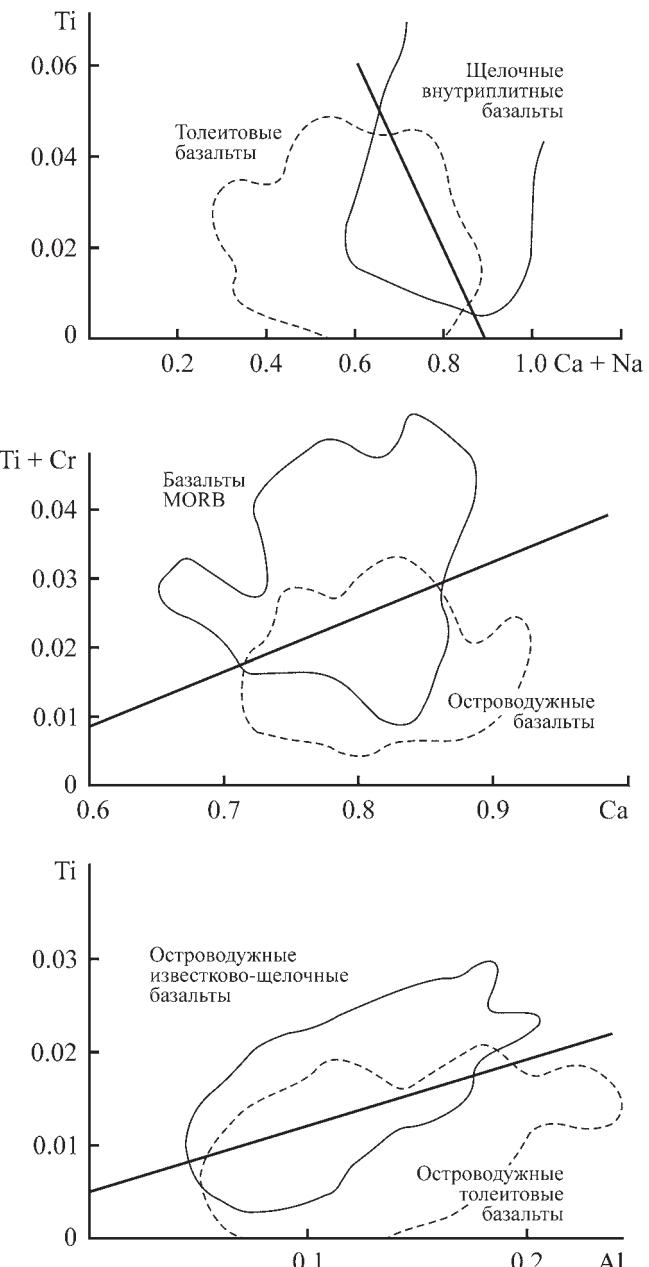
$$F_1 = -0.012\text{SiO}_2 - 0.0807\text{TiO}_2 + 0.0026\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0012\text{FeO} - 0.0026\text{MnO} + 0.0087\text{MgO} - 0.0128\text{CaO} - 0.0419\text{Na}_2\text{O}; F_2 = -0.0496\text{SiO}_2 - 0.0818\text{TiO}_2 - 0.02126\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0041\text{FeO} - 0.1435\text{MnO} - 0.0029\text{MgO} - 0.0085\text{CaO} + 0.0160\text{Na}_2\text{O}.$$

**Fig. 18.** Plot of discriminant functions,  $F_1$  against  $F_2$ , for pyroxene analyses from basic lavas of the magma type (Nisbet, Pearce, 1977).

$$F_1 = -0.012\text{SiO}_2 - 0.0807\text{TiO}_2 + 0.0026\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0012\text{FeO} - 0.0026\text{MnO} + 0.0087\text{MgO} - 0.0128\text{CaO} - 0.0419\text{Na}_2\text{O}; F_2 = -0.0496\text{SiO}_2 - 0.0818\text{TiO}_2 - 0.02126\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0041\text{FeO} - 0.1435\text{MnO} - 0.0029\text{MgO} - 0.0085\text{CaO} + 0.0160\text{Na}_2\text{O}.$$

и характеристики пород источников сноса/петрофонда. Тяжелые обломочные минералы могут быть подчас единственными свидетелями первоначальной палеогеодинамической обстановки. С применением новейших методов аналитики и дискриминационных диаграмм представляется возможным различить не просто магматический и метаморфический петрофонд, но и определить степень метаморфизма, а также дифференцировать магматические породы (диаграммы распределения гранатов, состав основных элементов турмалина, систематика рутила Cr-Nb, термометрия Zr-в-рутиле и др.). Все это становится доступным при учете особенностей распределения минералов по фракциям (например, альмандин), устойчивости минералов в процессах переноса и в условиях химического выветривания.

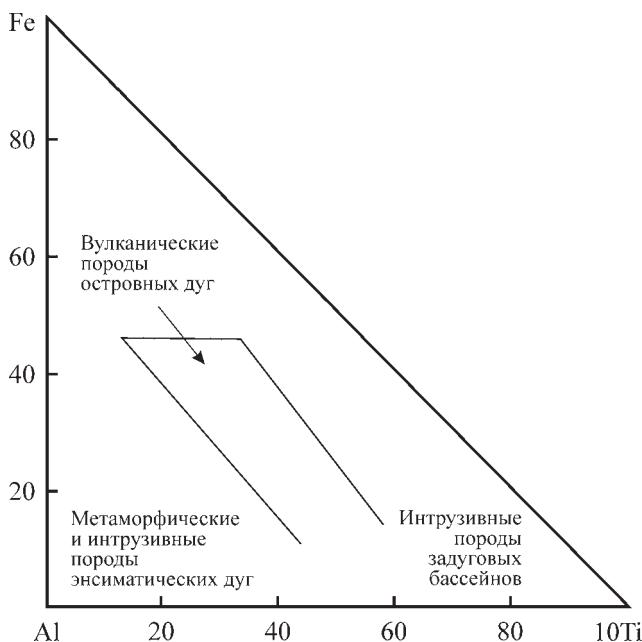
В последнее время в отечественной литературе все больший акцент делается на изучение обло-



**Рис. 19.** Диаграммы распределения  $\text{Ti}-\text{Ca} + \text{Na}$ ,  $\text{Ti} + \text{Cr}-\text{Ca}$ ,  $\text{Ti}-\text{Al}$  для клинопироксенов из различных базальтов (Leterrier et al., 1982).

**Fig. 19.** Discrimination diagrams  $\text{Ti}-\text{Ca} + \text{Na}$ ,  $\text{Ti} + \text{Cr}-\text{Ca}$ ,  $\text{Ti}-\text{Al}$  for clinopyroxene from different basalts (Leterrier et al., 1982).

мочных цирконов в качестве основного источника информации о возрасте и составе пород в областях размыва. В данной статье авторы хотели показать, что существует заметно более широкий спектр информативных минералов тяжелой фракции, которые также можно и нужно привлекать к использованию при различного рода реконструкциях, поскольку только комплексный подход может дать



**Рис. 20.** Диаграмма Al–Fe–10Ti распределения амфиболов на основе их химических характеристик (Nechaev, 1991).

**Fig. 20.** Discrimination diagram Al–Fe–10Ti for amphibole on the basis of their chemical characteristics (Nechaev, 1991).

наиболее объективную информацию об обстановках формирования осадочных последовательностей.

Целью этого краткого обзора не является перечисление всех возможных минералов, применяемых для анализа происхождения пород источников обломочного материала. Однако в нем рассматриваются некоторые аналитические методы и подходы, которые редко используются, но при этом имеют значительный потенциал для получения важных данных о материнских породах.

Кроме того, всегда необходимо помнить, что история формирования осадочных последовательностей может включать множество циклов накопления и переотложения обломочного материала. Очевидно также, что те или иные минералы (как легкой, так и тяжелой фракций) могли поступать в осадок из различных источников либо из одного источника, но в разные временные рамки (с перерывами или без них). Поэтому при исследовании песчаников нужно обращать внимание на принадлежность их к породам первого цикла седиментации (петrogenные образования) или литогенным разностям и соответственно корректировать выводы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Литогеохимия терригенных ассоциаций южных впадин Предуральского прогиба. (2015) (Отв. ред. А.В. Маслов). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 308 с.
- Малиновский А.И., Маркевич В.П., Тучкова М.И. (2006) Тяжелые обломочные минералы терригенных пород как индикаторы геодинамических обстановок в палеобассейнах орогенных областей востока Азии. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, (2), 97-111.
- 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.
- 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*, **20**(1), 40-62. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62.
- Мизенс Г.А., Маслов А.В., Бадида Л.В., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л., Хиллер В.В. (2015) Молласса Бельской впадины Предуральского прогиба: современный взгляд на источники сноса. *Докл. АН*, **465**(4), 460-463. DOI: 10.7868/S0869565215340204.
- Соболев Н.В. (1964) Парагенетические типы гранатов. М.: Наука, 218 с.
- Шука С.А., Бржосек А.А. (1983) Ультраосновной вулканализм Тихоокеанского пояса и вопросы систематики меймечитов и коматитов. *Вулканология и сейсмология*, (2), 3-15.
- Allen C.M., Campbell I.H. (2007) Spot dating of detrital rutile by LA-Q-ICP-MS: a powerful provenance tool. *GSA Denver Annual Meeting. Abstract*, p. 196-12.
- Andò S., Garzanti E., Padoan M., Limonta M. (2012) Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: a catalog for optical analysis. *Sediment. Geol.*, **208**, 165-178. doi:10.1016/j.sedgeo.2012.03.023.
- Arai S. (1992) Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks a potential guide to magma chemistry. *Mineral. Mag.*, **56**(383), 173-184. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1992.056.383.04>.
- Aubrecht R., Méres Š., Sýkora M., Mikúš T. (2009) Provenance of the detrital garnets and spinels from the Albian sediments of the Czorsztyn Unit (Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica*, **60**(6), 463-483. doi: 10.2478/v10096-009-0034-z.
- Avigad D., Morag N., Abbo A., Gerdes A. (2017) Detrital rutile U-Pb perspective on the origin of the great Cambro-Ordovician sandstone of North Gondwana and its linkage to orogeny. *Gondwana Res.*, **51**, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.07.001>.
- Chopin C. (1983) Magnesiochloritoid, a key-mineral for the petrogenesis of high-grade pelitic blueschists. *Bull. Mineral.*, **106**, 715-717. DOI: 10.3406/bulmi.1983.7692.
- Chopin C., Schreyer W. (1983) Magnesiocarpholite and magnesiochloritoid: two index minerals of pelitic blueschists and their preliminary phase relations in the model system MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. *Am. J. Sci.*, **283**, 72-96.
- Cookenboo H.O., Bustin R.M., Wilks K.R. (1997) Detrital chromian spinel compositions used to reconstruct the

- tectonic setting of provenance: implications for orogeny in the Canadian cordillera. *J. Sediment. Res.*, **67**, 116-123. <https://doi.org/10.1306/D4268509-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Copjakova R., Sulovsky P., Paterson B.A. (2005) Major and trace elements in pyrope-almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahany Uplands, Bohemian Massif. *Lithos*, **82**(1-2), 51-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.12.006>.
- Dick H.J.B., Bullen T. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 54-76. <https://doi.org/10.1007/BF00373711>.
- Dutrow B.L., Henry D.J. (2011) Tourmaline: a geologic DVD. *Elements*, **7**, 301-306. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.301>.
- Ertl A. (2009) Characterisation of tourmalines from different environments and correlations between structural and chemical data. Dissertation Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.), University of Vienna. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie, 888 p.
- Farnsworth-Pinkerton S., McMillan N.J., Dutrow B.L., Henry D.J. (2018) Provenance of detrital tourmalines from Proterozoic metasedimentary rocks in the Picuris Mountains, New Mexico, using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *J. Geosci.*, **63**, 193-198. DOI: [10.3190/jgeosci.261](https://doi.org/10.3190/jgeosci.261).
- Faupl P., Pavlopoulos A., Klotzli U., Petrakakis K. (2006) On the provenance of mid-Cretaceous turbidites of the Pindos zone (Greece): implications from heavy mineral distribution, detrital zircon ages and chrome spinel chemistry. *Geol. Mag.*, **143**(3), 329-342. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001675680600197X>
- Force E.R. (1980) The provenance of rutile. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(2), 485-488. <https://doi.org/10.1306/212F7A31-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Garzanti E., Andò S., Vezzoli G. (2008) Settling-equivalence of detrital minerals and grain size dependence of sediment composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **273**, 138-151. doi:10.1016/j.epsl.2008.06.020.
- Garzanti E., Limonta M., Resentini A., Bandopadhyay P.C., Najman Y., Andò S., Vezzoli G. (2013) Sediment recycling at convergent plate margins (Indo-Birman Ranges and Andaman-Nicobar Ridge). *Earth Sci. Rev.*, **123**, 113-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.008>.
- Hallsworth C.R., Chisholm J.I. (2008) Provenance of late Carboniferous sandstones in the Pennine Basin (UK) from combined heavy mineral, garnet geochemistry and palaeocurrent studies. *Sediment. Geol.*, **203**(3), 196-212. DOI: [10.1016/j.sedgeo.2007.11.002](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.11.002)
- Haughton P.D.W., Farrow C.M. (1989) Compositional variations in Lower Old Red Sandstone garnets from the Midland Valley of Scotland and the Anglo-Welsh Basin. *Geol. Mag.*, **126**, 373-396. DOI: [10.1017/S0016756800006579](https://doi.org/10.1017/S0016756800006579).
- Hegner E., Gruler M., Hann H.P., Chen F., Güldenphenning M. (2005) Testing tectonic models with geochemical provenance parameters in greywacke. *J. Geol. Soc. (London)*, **162**, 87-96. DOI: <https://doi.org/10.1144/0016-764904-029>.
- Henry D.J., Dutrow B.L. (1992) Tourmaline in a low grade clastic metasedimentary rock: an example of the petrogenetic potential of tourmaline. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **112**, 203-218. DOI: [10.1007/BF00310455](https://doi.org/10.1007/BF00310455).
- Henry D.J., Dutrow B.L. (1996) Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. *Boron: mineralogy, petrology and geochemistry*. Eds E.S. Grew, L.M. Anovitz. *Rev. Mineral.*, **33**, 503-557.
- Henry D.J., Guidotti C.V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am. Mineral.*, **70**, 1-15.
- Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzota F. (2011) Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *Am. Mineral.*, **96**(5-6), 895-913. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2011.3636>
- Irvine T.N. (1974) Petrology of the Duke Island ultramafic complex, southeastern Alaska. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **138**, 240 p. DOI:<https://doi.org/10.1130/MEM138-p1>.
- Kamenetsky V., Crawford A., Meffre S. (2001) Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *J. Petrol.*, **42**(4), 655-671. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.4.655>.
- Kanouo N.S., Yongue R.F., Chen S., Njonfang E., Ma C., Ghogomu T.R., Zhao J., Sababa E. (2012) Greyish-Black Rutile Megacrysts from the Nsanaragati Gem Placer, SW Cameroon: Geochemical Features and Genesis. *J. Geogr. Geol.*, **4**(2), 134-146. DOI: <https://doi.org/10.5539/jgg.v4n2p134>.
- Kooijman E., Mezger K., Berndt J. (2010) Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **293**(3-4), 321-330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.047>.
- Kooijman E., Smit M.A., Mezger K., Berndt J. (2012) Trace element systematics in granulite facies rutile: implications for Zr geothermometry and provenance studies. *J. Metamorph. Geol.*, **30**, 397-412. DOI: [10.1111/j.1525-1314.2012.00972.x](https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2012.00972.x).
- Kowal-Linka M., Stawikowski W. (2013) Garnet and tourmaline as provenance indicators of terrigenous material in epicontinental carbonates (Middle Triassic, S Poland). *Sediment. Geol.*, **291**, 27-47. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.03.005>.
- Krawinkel H., Wozazek S., Krawinkel J., Hellmann W. (1999) Heavy-mineral analysis and clinopyroxene geochemistry applied to provenance analysis of lithic sandstones from the Azuero-Sona complex (NW Panama). *Sediment. Geol.*, **124**, 149-168. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00125-0).
- Krippner A., Meinhold G., Morton A.C., von Eynatten H. (2014) Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks. *Sediment. Geol.*, **306**, 36-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.03.004>.
- Lenaz D., Kamenetsky V., Crawford A., Princivalle F. (2000) Melt inclusions in detrital spinel from the SE Alps (Italy-Slovenia): a new approach to provenance studies of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**(6), 748-758. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100000170>.
- Leterrier J., Maury R.C., Thonon P. (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **59**, 139-154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
- Mange M.A., Maurer H.F.W. (1991) Schwerminerale in Farbe. Stuttgart: Enke, 148 p.
- Mange M.A., Morton A.C. (2007) Geochemistry of heavy

- minerals. *Heavy Minerals in Use*. Eds M.A. Mange, D.T. Wright. *Dev. Sediment.*, **58**. Elsevier, Amsterdam, 345-391.
- Martínek K., Štolfová K. (2009) Provenance study of Permian non-marine sandstones and conglomerates of the Krkonoše Piedmont Basin (Czech Republic): exotic marine limestone pebbles, heavy minerals and garnet composition. *Bull. Geosci.*, **84**(3), 555-568. DOI: 10.3140/bull.geosci.1064.
- Meinhold G. (2010) Rutile and its applications in earth sciences. *Earth Sci. Rev.*, **102**(1-2), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.001>.
- Meinhold G., Anders B., Kostopoulos D., Reischmann T. (2008) Rutile chemistry and thermometry as provenance indicator: An example from Chios Island, Greece. *Sediment. Geol.*, **203**(1-2), 98-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.11.004>.
- Meinhold G., Morton A.C., Fanning C.M., Whitham A.G. (2011) U-Pb SHRIMP ages of detrital granulite-facies rutiles: further constraints on provenance of Jurassic sandstones on the Norwegian margin. *Geol. Mag.*, **148**, 473-480. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000877>.
- Meinhold G., Reischmann T., Kostopoulos D., Frei D., Larionov A.N. (2010) Mineral chemical and geochronological constraints on the age and provenance of the eastern Circum-Rhodope Belt low-grade metasedimentary rocks, NE Greece. *Sediment. Geol.*, **229**(4), 207-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.06.007>.
- Morton A.C. (1991) Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. *Development in sedimentary provenance studies*. Eds A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Houghton. Spec. Publ. Geol. Soc. London, **57**, 31-45. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.04>.
- Morton A.C. (1985) Heavy minerals in provenance studies. *Provenance of Arenites*. Ed. G.G. Zuffa. Dordrecht: Reidel, 249-277. DOI: 10.1007/978-94-017-2809-6\_12.
- Morton A.C. (1987) Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the Forties sandstone, Paleocene, central North Sea. *J. Sediment. Petrol.*, **57**, 1027-1032. <http://dx.doi.org/10.1306/212F8CD8-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Morton A., Chenary S. (2009) Detrital Rutile Geochemistry and Thermometry as Guides to Provenance of Jurassic-Paleocene Sandstones of the Norwegian Sea. *J. Sed. Res.*, **79**(7), 540-553. DOI: <https://doi.org/10.2110/jsr.2009.054>.
- Morton A., Hallsworth C., Chalton B. (2004) Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: a framework for interpretation of North Sea sandstone provenance. *Mar. Petrol. Geol.*, **21**(3), 393-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.001>.
- Nascimento M., Góes A., Macambira M., Brod J. (2007) Provenance of Albian sandstones in the São Luís-Grajaú Basin (northern Brazil) from evidence of Pb-Pb zircon ages, mineral chemistry of tourmaline and palaeocurrent data. *Sediment. Geol.*, **201**(1-2), 21-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.04.005>.
- Nechaev V.P. (1991) Evolution of the Philippine and Japan Seas from the clastic sediment record. *Mar. Geol.*, **97**, 167-190. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90025-Y.
- Nemec O., Huraiová M. (2018) Provenance study of detrital garnets and rutiles from basaltic pyroclastic rocks of Southern Slovakia (Western Carpathians). *Geol. Carpathica*, **69**(1), 17-29. doi: 10.1515/geoca-2018-0002.
- Nisbet E.G., Pearce J.A. (1977) Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63**, 149-160. <https://doi.org/10.1007/BF00398776>.
- Okay N., Zack T., Okay A.I., Barth M. (2011) Sinistral transport along the Trans-European Suture Zone: detrital zircon-rutile geochronology and sandstone petrography from the Carboniferous flysch of the Pontides. *Geol. Mag.*, **148**(3), 380-403. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000804>.
- Rosel D., Zack T., Barth M., Moller A., Oalmann J. (2011) U/Pb age spectra of detrital rutile as a powerful tool for provenance analysis. *Mineral. Mag.*, **75**, 1735.
- Rosel D., Zack T., Boger S.D. (2014) LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital rutile and zircon from the Reynolds Range. A window into the Palaeoproterozoic tectono-sedimentary evolution of the North Australian Craton. *Precambr. Res.*, **255**, 381-400. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.006>.
- Rosel D., Zack T., Moller A. (2018) Interpretation and significance of combined trace element and U-Pb isotopic data of detrital rutile: a case study from late Ordovician sedimentary rocks of Saxo-Thuringia, Germany. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1643-5>.
- Rozendaal A., Philander C., Carelse C. (2009) Characteristics, recovery and provenance of rutile from the Namakwa Sands heavy mineral deposit, South Africa. *What next. The 7th Int. Heavy Minerals Conf.* The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 9-16.
- Salata D. (2014) Detrital tourmaline as an indicator of source rock lithology: an example from the Ropianka and Menilit formations (Skole Nappe, Polish Flysch Carpathians). *Geol. Quarterly*, **58**(1), 19-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1133>.
- Schuiling R.D., deMeijer R.J., Riezebos H.J., Scholten M.J. (1985) Grain size distribution of different minerals in a sediment as a function of their specific density. *Geol. Mijnbouw*, **64**, 199-203.
- Small D., Parrish R.R., Austin W.E.N., Cawood P.A., Rinterknecht V. (2013) Provenance of North Atlantic ice-rafter debris during the last deglaciation – a new application of U-Pb rutile and zircon geochronology. *Geology*, **41**(2), 155-158. <https://doi.org/10.1130/G33594.1>.
- Stendal H., Toteu S.F., Frei R., Penaye J., Njel U.O., Bassahak J., Nni J., Kankeu B., Ngako V., Hell J.V. (2006) Derivation of detrital rutile in the Yaoundé region from the Neoproterozoic Pan-African belt in southern Cameroon (Central Africa). *J. African Earth Sci.*, **44**, 443-458. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.012>.
- Tebbens L.A., Kroonenberg S.B., van der Berg M.W. (1995) Compositional variation of detrital garnets in Quaternary Rhine, Meuse and Baltic River sediments in the Netherlands. *Geol. Mijnbouw*, **74**, 213-224.
- Teraoka Y. (2003) Detrital garnets from Paleozoic to Tertiary sandstones in Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **54**, 171-192.
- Tomkins H.S., Powell R., Ellis D.J. (2007) The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *J. Metamorph. Geol.*, **25**(6), 703-713. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00724.x>.
- Triebold S., von Eynatten H., Luvizotto G., Zack T. (2007)

- Deducing source rock lithology from detrital rutile geochemistry: An example from the Erzgebirge, Germany. *Chem. Geol.*, **244**(3-4), 421-436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.06.033>.
- Triebold S., von Eynatten H., Zack T. (2005) Trace elements in detrital rutile as provenance indicator: A case study from the Erzgebirge, Germany. *Sediment 2005, Abstracts. Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.* (Eds H. Haas, K. Ramseyer, F. Schlunegger), **38**, 144-145.
- Triebold S., von Eynatten H., Zack T. (2012) A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis. *Sed. Geol.*, **282**, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.09.008>.
- Újvári G., Klötzli U., Kiraly F., Ntaflos T. (2013) Towards identifying the origin of metamorphic components in Austrian loess: insights from detrital rutile chemistry, thermometry and U-Pb geochronology. *Quat. Sci. Rev.*, **75**, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.06.002>.
- Vďačný M., Bačík P. (2015) Provenance of the Permian Malužina Formation sandstones (Male Karpaty Mountains, Western Carpathians): evidence of garnet and tourmaline mineral chemistry. *Geol. Carpathica*, **66**(2), 83-97. doi: 10.1515/geoca-2015-0012.
- Velbel M.A. (2007) Surface textures and dissolution processes of heavy minerals in the sedimentary cycle: examples from pyroxenes and amphiboles. *Heavy Minerals in Use*. Eds M. Mange, D.K. Wright. *Dev. Sediment.*, **58**. Amsterdam, Elsevier, 112-150.
- Viator D.B. (2003) Detrital Tourmaline as an Indicator of Provenance: a Chemical and Sedimentological Study of Modern Sands from the Black Hills, South Dakota. MSci. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, 139 p.
- von Eynatten H., Gaupp R. (1999) Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sed. Geol.*, **124**, 81-111. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00122-5).
- Wright W.I. (1938) The composition and occurrence of garnets. *Am. Miner.*, **23**, 436-449.
- Zack T., Moraes R., Kronz A. (2004a) Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **148**, 471-488. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0617-8>.
- Zack T., von Eynatten H.V., Kronz A. (2004b) Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sediment. Geol.*, **171**, 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.009>.
- sediments of the Czorsztyn Unit (Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica*, **60**(6), 463-483. doi: 10.2478/v10096-009-0034-z.
- Avigad D., Morag N., Abbo A., Gerdes A. (2017) Detrital rutile U-Pb perspective on the origin of the great Cambro-Ordovician sandstone of North Gondwana and its linkage to orogeny. *Gondwana Res.*, **51**, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.07.001>.
- Chopin C. (1983) Magnesiochloritoid, a key-mineral for the petrogenesis of high-grade pelitic blueschists. *Bull. Mineral.*, **106**, 715-717. DOI: 10.3406/bulmi.1983.7692.
- Chopin C., Schreyer W. (1983) Magnesiocarpholite and magnesiochloritoid: two index minerals of pelitic blueschists and their preliminary phase relations in the model system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Am. J. Sci.*, **283**, 72-96.
- Cookenboo H.O., Bustin R.M., Wilks K.R. (1997) Detrital chromian spinel compositions used to reconstruct the tectonic setting of provenance: implications for orogeny in the Canadian cordillera. *J. Sediment. Res.*, **67**, 116-123. <https://doi.org/10.1306/D4268509-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Copjakova R., Sulovsky P., Paterson B.A. (2005) Major and trace elements in pyrope-almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahany Uplands, Bohemian Massif. *Lithos*, **82**(1-2), 51-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.12.006>.
- Dick H.J.B., Bullen T. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 54-76. <https://doi.org/10.1007/BF00373711>.
- Dutrow B.L., Henry D.J. (2011) Tourmaline: a geologic DVD. *Elements*, **7**, 301-306. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.301>.
- Ertl A. (2009) Characterisation of tourmalines from different environments and correlations between structural and chemical data. Dissertation Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.), University of Vienna. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie, 888 p.
- Farnsworth-Pinkerton S., McMillan N.J., Dutrow B.L., Henry D.J. (2018) Provenance of detrital tourmalines from Proterozoic metasedimentary rocks in the Picuris Mountains, New Mexico, using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *J. Geosci.*, **63**, 193-198. DOI: 10.3190/jgeosci.261.
- Faupl P., Pavlopoulos A., Klotzli U., Petrakakis K. (2006) On the provenance of mid-Cretaceous turbidites of the Pindos zone (Greece): implications from heavy mineral distribution, detrital zircon ages and chrome spinel chemistry. *Geol. Mag.*, **143**(3), 329-342. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001675680600197X>
- Force E.R. (1980) The provenance of rutile. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(2), 485-488. <https://doi.org/10.1306/212F7A31-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Garzanti E., Andò S., Vezzoli G. (2008) Settling-equivalence of detrital minerals and grain size dependence of sediment composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **273**, 138-151. doi:10.1016/j.epsl.2008.06.020.
- Garzanti E., Limonta M., Resentini A., Bandopadhyay P.C., Najman Y., Andò S., Vezzoli G. (2013) Sediment recycling at convergent plate margins (Indo-Burman Ranges and Andaman-Nicobar Ridge). *Earth Sci. Rev.*, **123**, 113-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.008>.
- Hallsworth C.R., Chisholm J.I. (2008) Provenance of late

## REFERENCES

- Allen C.M., Campbell I.H. (2007) Spot dating of detrital rutile by LA-Q-ICP-MS: a powerful provenance tool. *GSA Denver Annual Meeting. Abstract*, p. 196-12.
- Andò S., Garzanti E., Padoan M., Limonta M. (2012) Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: a catalog for optical analysis. *Sediment. Geol.*, **208**, 165-178. doi:10.1016/j.sedgeo.2012.03.023.
- Arai S. (1992) Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks a potential guide to magma chemistry. *Mineral. Mag.*, **56**(383), 173-184. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1992.056.383.04>.
- Aubrecht R., Méres Š., Sýkora M., Mikus T. (2009) Provenance of the detrital garnets and spinels from the Albian

- Carboniferous sandstones in the Pennine Basin (UK) from combined heavy mineral, garnet geochemistry and palaeocurrent studies. *Sediment. Geol.*, **203**(3), 196-212. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2007.11.002
- Haughton P.D.W., Farrow C.M. (1989) Compositional variations in Lower Old Red Sandstone garnets from the Midland Valley of Scotland and the Anglo-Welsh Basin. *Geol. Mag.*, **126**, 373-396. DOI: 10.1017/S0016756800006579.
- Hegner E., Gruler M., Hann H.P., Chen F., Güldenphenning M. (2005) Testing tectonic models with geochemical provenance parameters in greywacke. *J. Geol. Soc. (London)*, **162**, 87-96. DOI: https://doi.org/10.1144/0016-764904-029.
- Henry D.J., Dutrow B.L. (1992) Tourmaline in a low grade clastic metasedimentary rock: an example of the petrogenetic potential of tourmaline. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **112**, 203-218. DOI: 10.1007/BF00310455.
- Henry D.J., Dutrow B.L. (1996) Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. *Boron: mineralogy, petrology and geochemistry* (Eds E.S. Grew, L.M. Anovitz). *Rev. Mineral.*, **33**, 503-557.
- Henry D.J., Guidotti C.V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am. Mineral.*, **70**, 1-15.
- Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzota F. (2011) Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *Am. Mineral.*, **96**(5-6), 895-913. DOI: https://doi.org/10.2138/am.2011.3636
- Irvine T.N. (1974) Petrology of the Duke Island ultramafic complex, southeastern Alaska. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **138**, 240 p. DOI:https://doi.org/10.1130/MEM138-p1.
- Kamenetsky V., Crawford A., Meffre S. (2001) Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *J. Petrol.*, **42**(4), 655-671. DOI: https://doi.org/10.1093/petrology/42.4.655.
- Kanouo N.S., Yongue R.F., Chen S., Njonfang E., Ma C., Ghogomu T.R., Zhao J., Sababa E. (2012) Greyish-Black Rutile Megacrysts from the Nsanaragati Gem Placer, SW Cameroon: Geochemical Features and Genesis. *J. Geogr. Geol.*, **4**(2), 134-146. DOI: https://doi.org/10.5539/jgg.v4n2p134.
- Kooijman E., Mezger K., Berndt J. (2010) Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **293**(3-4), 321-330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.047.
- Kooijman E., Smit M.A., Mezger K., Berndt J. (2012) Trace element systematics in granulite facies rutile: implications for Zr geothermometry and provenance studies. *J. Metamorph. Geol.*, **30**, 397-412. DOI: 10.1111/j.1525-1314.2012.00972.x.
- Kowal-Linka M., Stawikowski W. (2013) Garnet and tourmaline as provenance indicators of terrigenous material in epicontinental carbonates (Middle Triassic, S Poland). *Sediment. Geol.*, **291**, 27-47. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.03.005.
- Krawinkel H., Wozazek S., Krawinkel J., Hellmann W. (1999) Heavy-mineral analysis and clinopyroxene geochemistry applied to provenance analysis of lithic sandstones from the Azuero-Sona complex (NW Panama). *Sediment. Geol.*, **124**, 149-168. https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00125-0.
- Krippner A., Meinhold G., Morton A.C., von Eynattena H. (2014) Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks. *Sediment. Geol.*, **306**, 36-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.03.004.
- Lenaz D., Kamenetsky V., Crawford A., Princivalle F. (2000) Melt inclusions in detrital spinel from the SE Alps (Italy-Slovenia): a new approach to provenance studies of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**(6), 748-758. DOI: https://doi.org/10.1007/s004100000170.
- Leterrier J., Maury R.C., Thonon P. (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **59**, 139-154. https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4.
- Litogeokhimiya terrigenykh assotsiatsii yuzhnykh vpadin Predural'skogo progiba* [Lithogeochimistry of the Cis-Uralian foredeep Southern depressions sedimentary series]. (2015) Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 308 p. (In Russian)
- Malinovskii A.I., Markevich V.P., Tuchkova M.I. (2006) Heavy detrital minerals of sedimentary rocks as the indicators of geodynamic environments for Eastern Asia orogenic palaeobasins. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, (2), 97-111. (In Russian)
- Mange M.A., Maurer H.F.W. (1991) Schwerminerale in Farbe. Stuttgart, Enke, 148 p.
- Mange M.A., Morton A.C. (2007) Geochemistry of heavy minerals. *Heavy Minerals in Use* (Eds M.A. Mange, D.T. Wright). *Dev. Sediment.*, **58**. Amsterdam, Elsevier, 345-391.
- Maslov A.V., Mel'nicuk 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. (In Russian)
- Maslov A.V., Mel'nicuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Litosfera*, **20**(1), 40-62. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62. (In Russian)
- Martinek K., Štolfová K. (2009) Provenance study of Permian non-marine sandstones and conglomerates of the Krkonoše Piedmont Basin (Czech Republic): exotic marine limestone pebbles, heavy minerals and garnet composition. *Bull. Geosci.*, **84**(3), 555-568. DOI: 10.3140/bull.geosci.1064.
- Meinhold G. (2010) Rutile and its applications in earth sciences. *Earth Sci. Rev.*, **102**(1-2), 1-28. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.001.
- Meinhold G., Anders B., Kostopoulos D., Reischmann T. (2008) Rutile chemistry and thermometry as provenance indicator: An example from Chios Island, Greece. *Sediment. Geol.*, **203**(1-2), 98-111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.11.004.
- Meinhold G., Morton A.C., Fanning C.M., Whitham A.G. (2011) U-Pb SHRIMP ages of detrital granulite-facies rutiles: further constraints on provenance of Jurassic sandstones on the Norwegian margin. *Geol. Mag.*, **148**, 473-480. https://doi.org/10.1017/S0016756810000877.
- Meinhold G., Reischmann T., Kostopoulos D., Frei D., Larionov A.N. (2010) Mineral chemical and geochronological constraints on the age and provenance of the eastern Circum-Rhodope Belt low-grade

- metasedimentary rocks, NE Greece. *Sediment. Geol.*, **229**(4), 207-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.06.007>.
- Mizens G.A., Maslov A.V., Badida L.V., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., Khiller V.V. (2015) Molasse of the Belskii depression of the Cis-Uralian foredeep: Modern data about provenance. *Dokl. Earth Sci.*, **465**(2), 1207-1210 (translated from *Dokl. AN*, **465**(4), 460-463). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120041>.
- Morton A.C. (1991) Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. *Development in sedimentary provenance studies*. Eds A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Houghton. Spec. Publ. Geol. Soc. London, **57**, 31-45. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.04>.
- Morton A.C. (1985) Heavy minerals in provenance studies. *Provenance of Arenites*. Ed. G.G. Zuffa. Dordrecht, Reidel, 249-277. DOI: 10.1007/978-94-017-2809-6\_12.
- Morton A.C. (1987) Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the Forties sandstone, Paleocene, central North Sea. *J. Sediment. Petrol.*, **57**, 1027-1032. <https://doi.org/10.1306/212F8CD8-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Morton A., Chenary S. (2009) Detrital Rutile Geochemistry and Thermometry as Guides to Provenance of Jurassic-Paleocene Sandstones of the Norwegian Sea. *J. Sediment. Res.*, **79**(7), 540-553. DOI: <https://doi.org/10.2110/jsr.2009.054>.
- Morton A., Hallsworth C., Chalton B. (2004) Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: a framework for interpretation of North Sea sandstone provenance. *Mar. Petrol. Geol.*, **21**(3), 393-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.001>.
- Nascimento M., Góes A., Macambira M., Brod J. (2007) Provenance of Albian sandstones in the São Luís–Grajaú Basin (northern Brazil) from evidence of Pb-Pb zircon ages, mineral chemistry of tourmaline and palaeocurrent data. *Sediment. Geol.*, **201**(1-2), 21-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.04.005>.
- Nechaev V.P. (1991) Evolution of the Philippine and Japan Seas from the clastic sediment record. *Mar. Geol.*, **97**, 167-190. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90025-Y.
- Nemec O., Hurairová M. (2018) Provenance study of detrital garnets and rutiles from basaltic pyroclastic rocks of Southern Slovakia (Western Carpathians). *Geol. Carpathica*, **69**(1), 17-29. doi: 10.1515/geoca-2018-0002.
- Nisbet E.G., Pearce J.A. (1977) Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63**, 149-160. <https://doi.org/10.1007/BF00398776>.
- Okay N., Zack T., Okay A.I., Barth M. (2011) Sinistral transport along the Trans-European Suture Zone: detrital zircon-rutile geochronology and sandstone petrography from the Carboniferous flysch of the Pontides. *Geol. Mag.*, **148**(3), 380-403. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000804>.
- Rosel D., Zack T., Barth M., Moller A., Oalmann J. (2011) U/Pb age spectra of detrital rutile as a powerful tool for provenance analysis. *Mineral. Mag.*, **75**, 1735.
- Rosel D., Zack T., Boger S.D. (2014) LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital rutile and zircon from the Reynolds Range. A window into the Palaeoproterozoic tectono-sedimentary evolution of the North Australian Craton. *Pre-cambr. Res.*, **255**, 381-400. <https://doi.org/10.1016/j.precambr.2014.10.006>.
- Rosel D., Zack T., Moller A. (2018) Interpretation and significance of combined trace element and U-Pb isotopic data of detrital rutile: a case study from late Ordovician sedimentary rocks of Saxo-Thuringia, Germany. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1643-5>.
- Rozendaal A., Philander C., Carelse C. (2009) Characteristics, recovery and provenance of rutile from the Namakwa Sands heavy mineral deposit, South Africa. *What next. The 7th Int. Heavy Minerals Conf.* The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 9-16.
- Salata D. (2014) Detrital tourmaline as an indicator of source rock lithology: an example from the Ropianka and Menilite formations (Skole Nappe, Polish Flysch Carpathians). *Geol. Quarterly*, **58**(1), 19-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1133>.
- Schuiling R.D., deMeijer R.J., Riezebos H.J., Scholten M.J. (1985) Grain size distribution of different minerals in a sediment as a function of their specific density. *Geol. Mijnbouw*, **64**, 199-203.
- Shchuka S.A., Vrzhosek A.A. (1983) Ultrabasic volcanism of the Pacific belt and systematics of meimechites and komatiites. *Vulkanologiya i Seismologiya*, (2), 3-15. (In Russian)
- Small D., Parrish R.R., Austin W.E.N., Cawood P.A., Rinkenreuth V. (2013) Provenance of North Atlantic ice-raftered debris during the last deglaciation – a new application of U-Pb rutile and zircon geochronology. *Geology*, **41**(2), 155-158. <https://doi.org/10.1130/G3359.1>.
- Sobolev N.V. (1964) *Parageneticheskie tipy granatov* [Paragenetic types of pomegranates]. Moscow, Nauka Publ., 218 p. (In Russian)
- Stendal H., Toteu S.F., Frei R., Penaye J., Njel U.O., Bas-sahak J., Nni J., Kankeu B., Ngako V., Hell J.V. (2006) Derivation of detrital rutile in the Yaoundé region from the Neoproterozoic Pan-African belt in southern Cameroon (Central Africa). *J. African Earth Sci.*, **44**, 443-458. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.012>.
- Tebbens L.A., Kroonenberg S.B., van der Berg M.W. (1995) Compositional variation of detrital garnets in Quaternary Rhine, Meuse and Baltic River sediments in the Netherlands. *Geol. Mijnbouw*, **74**, 213-224.
- Teraoka Y. (2003) Detrital garnets from Paleozoic to Tertiary sandstones in Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **54**, 171-192.
- Tomkins H.S., Powell R., Ellis D.J. (2007) The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *J. Metamorph. Geol.*, **25**(6), 703-713. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00724.x>.
- Triebold S., von Eynatten H., Luvizotto G., Zack T. (2007) Deducing source rock lithology from detrital rutile geochemistry: An example from the Erzgebirge, Germany. *Chem. Geol.*, **244**(3-4), 421-436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.06.033>.
- Triebold S., von Eynatten H., Zack T. (2005) Trace elements in detrital rutile as provenance indicator: A case study from the Erzgebirge, Germany. *Sediment 2005, Abstr. Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.* Eds H. Haas, K. Ramseyer, F. Schlunegger, **38**, 144-145.
- Triebold S., von Eynatten H., Zack T. (2012) A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis. *Sed. Geol.*, **282**, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.09.008>.

- Újvári G., Klötzli U., Kiraly F., Ntaflos T. (2013) Towards identifying the origin of metamorphic components in Austrian loess: insights from detrital rutile chemistry, thermometry and U-Pb geochronology. *Quat. Sci. Rev.*, **75**, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.06.002>.
- Vd'ačný M., Bačík P. (2015) Provenance of the Permian Malužina Formation sandstones (Male Karpaty Mountains, Western Carpathians): evidence of garnet and tourmaline mineral chemistry. *Geol. Carpathica*, **66**(2), 83-97. doi: 10.1515/geoca-2015-0012.
- Velbel M.A. (2007) Surface textures and dissolution processes of heavy minerals in the sedimentary cycle: examples from pyroxenes and amphiboles. *Heavy Minerals in Use*. Eds M. Mange, D.K. Wright. *Dev. Sediment.*, **58**. Amsterdam, Elsevier, 112-150.
- Viator D.B. (2003) Detrital Tourmaline as an Indicator of Provenance: a Chemical and Sedimentological Study of Modern Sands from the Black Hills, South Dakota. MSci. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, 139 p.
- von Eynatten H., Gaupp R. (1999) Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sed. Geol.*, **124**, 81-111. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00122-5).
- Wright W.I. (1938) The composition and occurrence of garnets. *Am. Miner.*, **23**, 436-449.
- Zack T., Moraes R., Kronz A. (2004a) Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **148**, 471-488. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0617-8>.
- Zack T., von Eynatten H.V., Kronz A. (2004b) Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sediment. Geol.*, **171**, 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.009>.