
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

ОБЛОМОЧНЫЙ ТУРМАЛИН ИЗ РИФЕЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СРЕДНЕГО ТИМАНА: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ГЕНЕЗИС

© 2022 г. Е. А. Брусницына¹, *, д. чл. О. С. Верещагин², **, В. Б. Ершова^{2, 3}, ***

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Средний проспект В.О., 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Геологический институт РАН, Пыжжевский пер., 7с1, Москва, 119017 Россия

*e-mail: brusnicyna@yandex.ru

**e-mail: o.vereshchagin@spbu.ru

***e-mail: v.ershova@spbu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принята к публикации 09.12.2021 г.

Приводятся данные о химическом составе и степени окатанности обломочного турмалина из четлаской, быстринской, вымской и кислоручейской серий метатерригенных пород верхнего докембрия Среднего Тимана. Обломки кристаллов изученного турмалина преимущественно однородны (без видимой зональности и секториальности), относятся к щелочной группе и гидрокси-подгруппе (дравиту и шерлу) надгруппы турмалина. Сходство по химическому составу указывает на единый источник обломков этого минерала для всех изученных рифейских осадочных пород в пределах изучаемого региона, а низкая степень окатанности – на близость расположения коренного источника. Сопоставление турмалина с находящимся в ассоциации обломочным цирконом позволило заключить, что источником кластического материала для формирования метатерригенных пород верхнего докембрия Среднего Тимана были метаморфические комплексы в террейнах Свеконорвежско-Гренвильского орогена.

Ключевые слова: Средний Тиман, рифей, турмалин, циркон, тяжелые минералы

DOI: 10.31857/S0869605522010038

ВВЕДЕНИЕ

Минералы тяжелой фракции (циркон, рутил, гранат, турмалин, апатит и другие) широко и успешно применяются при исследовании терригенных пород, особенно при реконструкциях путей перемещения и источников сноса обломочного материала (Fedo et al., 2003; Kooyman et al., 2010; Gehrels, 2012, 2014; Kowal-Linka, Stawikowski 2013; Vďačný, Vašík, 2015, и др.).

На сегодняшний день U-Pb датирование обломочного циркона является наиболее широко применяемым инструментом для исследования обломочных пород и получения информации о строении питающих провинций (Dickinson, 1970; Dickinson, Gehrels, 2009; Coutts et al., 2019; Johnstone et al., 2019, и др.). Этот метод позволяет установить возраст циркона, который отвечает возрасту магматических или метаморфических комплексов в источнике сноса (Cawood et al., 2012; Gehrels, 2012, 2014, и др.). Однако, из-за высокой устойчивости циркона к физическому разрушению и химиче-

скому выветриванию, зерна этого минерала могут подвергаться многократному переложению в осадочных бассейнах, что усложняет интерпретацию источников сноса и путей транспортировки обломочного материала (Fedo et al., 2003; Gehrels, 2012, и др.). Кроме того, U-Pb датирование циркона не может дать информацию о петрографическом составе исходных (материнских) пород (Fedo et al., 2003; Sawood et al., 2012; Gehrels, 2012, 2014). Решить эту проблему помогает изучение химического состава минералов тяжелой фракции, в том числе граната, рутила, турмалина (Henry, Guidotti, 1985; Morton, Hallsworth, 1999; Triebold et al., 2012; Kowal-Linka, Stawikowski 2013; Vďačný, Vašík, 2015, и др.).

Минералы надгруппы турмалина – это сложные боросиликаты с общей формулой: $X_{0-1}Y_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ (Henry et al., 2011), где X – Na^+ , Ca^{2+} , K^+ или вакансия (\square); Y – Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Li^+ и др.; Z – Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} и др.; T – Si^{4+} , Al^{3+} , B^{3+} ; V – OH^- , O^{2-} ; W – OH^- , O^{2-} , F^- . Группы надгруппы турмалина выделяются на основе элементов, входящих в позицию X : выделены щелочные (Na^+ , K^+), кальциевые (Ca^{2+}) и с вакантной X -позицией. В зависимости от того, какие анионы входят в позицию W , группы надгруппы турмалина делят на три подгруппы – окси- (O^{2-}), фтор- (F^-) и гидроксид-турмалин (OH^-).

Минералы надгруппы турмалина кристаллизуются в широком диапазоне термобарохимических условий (Ertl et al., 2010; Bergyuan et al., 2019; Biernacka, 2019). Наиболее распространенные минералы надгруппы турмалина – шерл, эльбаит и дравит (Ertl et al., 2010; Biernacka, 2019, и др.). Шерл и Li-содержащие турмалины преимущественно формируются при кристаллизации гранитных массивов и гранитных пегматитов, а дравит часто образуется в метаморфических породах (Baksheev, Kudryavtseva, 2004; Trumbull et al., 2008; Arif et al., 2010; Ertl et al., 2010; Biernacka, 2019). Химический состав турмалина зависит от физико-химических условий его образования (van Hinsberg et al., 2011) и состава вмещающих пород (Henry, Guidotti, 1985). Большая изменчивость состава минералов надгруппы турмалина позволяет использовать их для реконструкции источников сноса и путей транспортировки обломочного материала (Biernacka, 2012; Kowal-Linka, Stawikowski, 2013; Vereshchagin et al., 2018).

Реконструкция источников сноса обломочных пород Тиманского региона на основе датирования обломочного циркона проводилось ранее (Кузнецов и др., 2010; Андреичев и др., 2013, 2014; Удоратина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др. 2021). Однако петрографический состав исходных (материнских) пород остается дискуссионным, так как исследования химического состава других минералов тяжелой фракции для докембрийских комплексов Тимана не проводилось. Результаты исследования обломочного турмалина, представленные в настоящей работе, в определенной мере способствуют решению этой задачи.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Тиманский кряж протягивается в северо-западном направлении на расстояние около 1000 км от Колво-Вишерского края до Чешской губы Баренцева моря и выделяется в рельефе в виде ряда сильно эродированных возвышенностей. Вдоль Тиманского кряжа на поверхность выходят семь крупных блоков (традиционно, на Тимане именуемые “камнями”), в пределах которых обнажаются в разной степени метаморфизованные докембрийские комплексы, пронизанные разновозрастными интрузиями основного состава (Оловянишников, 1998). Интрузивные тела в большинстве своем имеют девонский возраст, но были установлены единичные дайки позднедевонского возраста (Андреичев, 1998; Государственная..., 2020). Тиманская складчатая зона отделена с запада от Восточно-Европейской платформы (ВЕП) Западно-Тиманским

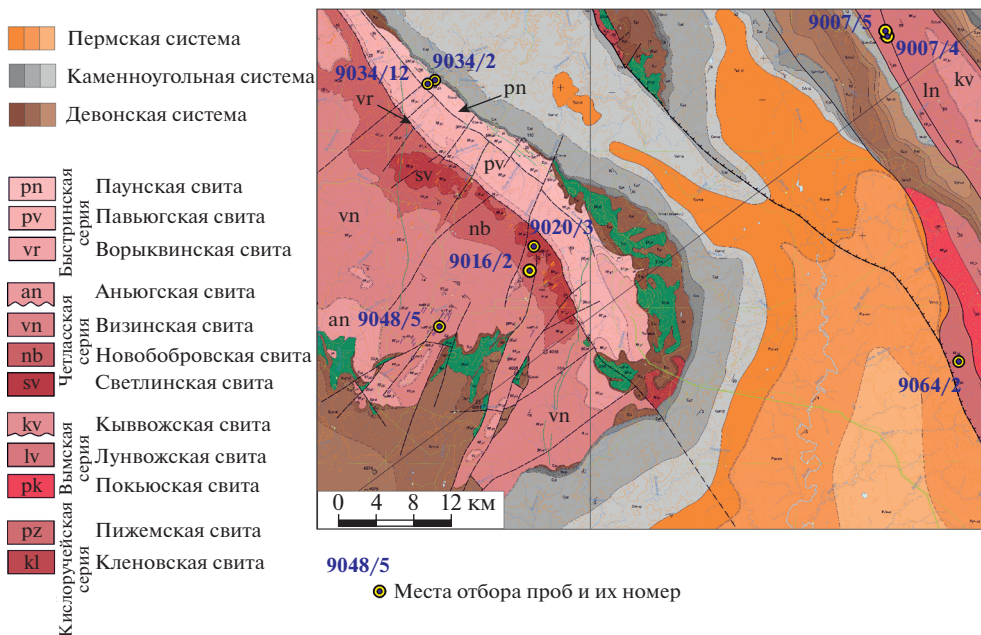


Рис. 1. Геологическая карта Четласского Камня и Вольско-Вымской гряды с местами отбора проб (по: Государственная..., 2020 с упрощениями).

Fig. 1. Geological map of the Chetlassky Kamen and Volsko-Vymskaya Ridge, with points of sampling, after (State..., 2020 simplified).

глубинным разломом, а на востоке ее граница с Печерской плитой проходит вдоль Восточно-Тиманского разлома (в пределах Ижемской зоны).

Район исследований расположен в средней части Тиманского кряжа (Средний Тиман) и включает Четласский Камень и Вольско-Вымскую гряду, в пределах которых выходят на дневную поверхность породы среднего и верхнего рифея (рис. 1).

По литологическому составу и возрасту осадочные породы Четласского Камня разделяются на две серии – четласскую и быстринскую (рис. 2). Большую часть выступа слагают породы четласской серии, включающей светлинскую, новобобровскую и визингскую свиты (рис. 1, 2). Наиболее древние отложения, относящиеся к светлинской свите, по данным предшествующих работ (Гецен, 1987; Оловянишников, 1998; Государственная..., 2015) и нашим полевым наблюдениям, подразделяются на две подсвиты. Нижняя подсвита представлена в основном слюдисто-кварцевыми и полевошпат-кварцево-сланцевыми сланцами с подчиненным количеством метапесчаников. Верхняя подсвита сложена метапесчаниками, среди которых присутствуют пачки переслаивания слюдисто-кварцевых сланцев и метаалевролитов. Новобобровская свита объединяет кварц-хлорит-серицитовые сланцы и метаалевролиты с прослоями метапесчаников. Визингская свита характеризуется ритмично переслаивающимися пачками кварц-хлорит-серицитовых сланцев, метаалевролитов и метапесчаников.

Вдоль северо-восточной части Четласского Камня полосой шириной от 2 до 7.5 км протягиваются отложения быстринской серии, которая включает ворыквинскую, павьюгскую и паунскую свиты (рис. 1, 2). Ворыквинская и павьюгская свиты сложены пачками переслаивающихся друг с другом доломитов, мергелей, известковых сланцев,

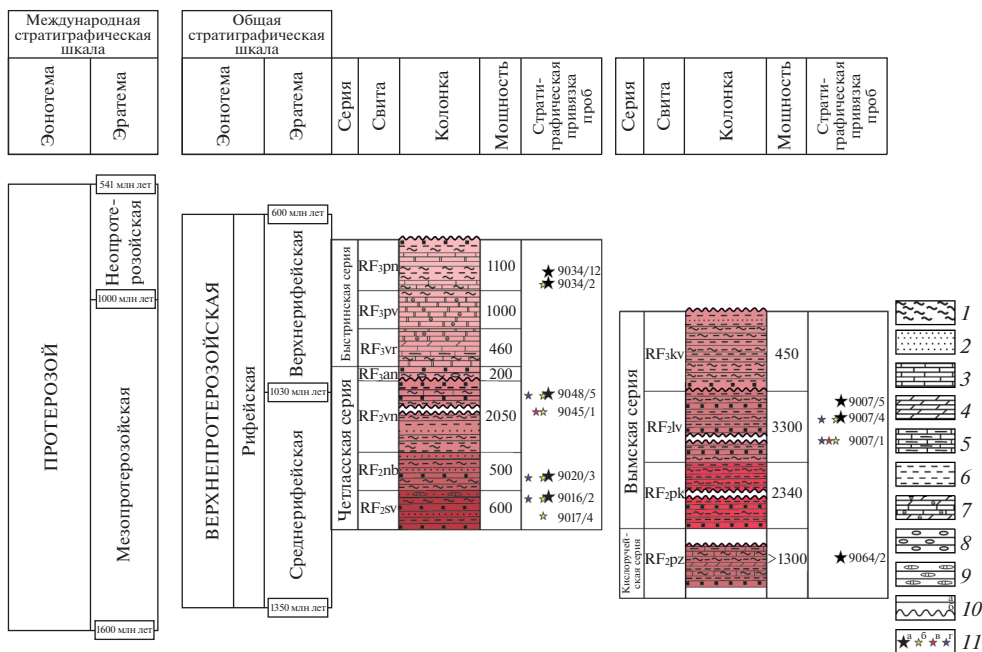


Рис. 2. Сводные стратиграфические колонки отложений рифея Четласского Камня и Вольско-Вымской гряды и положение исследованных образцов (Оловянишников, 1998; Государственная..., 2020).

1 – сланцы, 2 – метапесчаники, 3 – известняки, 4 – доломиты, 5 – мергели, 6 – металавролиты, 7 – известняки и доломиты со строматолитами, 8 – метаконгломераты, 9 – прослой кремней, 10 – стратиграфические границы (а – согласные, б – несогласные), 11 – изученные образцы и виды анализов (а – образцы обломочного турмалина; б – образцы обломочного циркона для U-Pb датирования; в – образцы обломочного рутила для U-Pb датирования; г – образцы обломочного циркона для Lu-Hf изотопно-геохимических характеристик).

Fig. 2. Summary stratigraphic columns of Riphean rocks of the Chetlassky Kamen and Volsko-Vymskaya Ridge, with points of sampling, after (Olovyaniishnikov, 1998; State..., 2020).

строматолитовых известняков. Паунская свита представлена сланцами кварц-серицит-хлоритового состава и метапесчаниками.

В пределах Вольско-Вымской гряды в средне-верхнерифейском разрезе выделяются пижемская, лунвожская и киввожская свиты, объединенные в вымскую серию (рис. 2). Состав пород вымской серии преимущественно представлен металавролитами, метааргиллитами и метапесчаниками.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения химического состава обломочного турмалина из терригенных пород рифейского возраста Среднего Тимана было отобрано 8 образцов. Ранее в этих же образцах был определен U-Pb возраст обломочного циркона и рутила (Брусницына и др., 2021). Положение проб в разрезе приведено на рис. 2. Изученные образцы характеризуют породы четласской, быстринской, вымской и кислоручейской серий.

В пределах Четласского Камня было исследовано пять проб, в которых были выделены зерна обломочного турмалина. Проба из светлинской свиты отобрана из отложе-

ний в верховьях р. Мезень. По литологическому составу образец из светлинской свиты – метапесчаник субаркозового состава (обр. 9016/2). Проба из новобобровской свиты отобрана в верховьях р. Мезень, порода представляет собой аркозовый метаалевропесчаник (обр. 9020/3). Проба из визингской свиты отобрана в верхнем течении р. Косью (правый приток р. Мезень), порода представляет собой метапесчаник, по составу относящийся к кварцевым аренитам (обр. 9048/5). Две пробы из отложений паунской свиты были отобраны в среднем течении р. Нижней Паун (приток р. Светлая, приток р. Пижда), их состав соответствует мусковит-кварцевым сланцам (обр. 9034/2 и 9034/12).

Обломочный турмалин был выделен из трех образцов в пределах *Вольско-Вымской гряды*. Проба из пижемской свиты была отобрана из разреза в верховьях р. Нижняя Видзю (приток р. Вымь). По литологическому составу порода представляет собой биотит-мусковитовый магнетитсодержащий сланец (обр. 9064/2). Две пробы из лунвожской свиты отобраны из отложений в среднем течении р. Средней. По литологическому составу эти породы – метаалевролиты, относящиеся к кварцевым аренитам и аркозам (обр. 9007/4 и обр. 9007/5 соответственно).

Предварительная пробоподготовка проведена по стандартной методике в ИГДД РАН. Пробы весом около 1.5–2.0 кг измельчали до размерности 0.25 мм, промывали и высушивали. После этого была проведена магнитная сепарация и удалены высокомагнитные минералы. Далее использовали бромформ для извлечения концентрата тяжелых минералов, который затем промывали в дистиллированной воде и сушили. Затем тяжелая фракция обрабатывалась разбавленным йодистым метиленом; полученный концентрат промывали в спирте и высушивали. Далее проводили электромагнитную сепарацию, разделяя пробу на электромагнитную и немагнитную фракции в соответствии с парамагнитными свойствами минералов. Турмалин обладает плотностью от 3.04 до 3.3 г/см³ (Selway et al., 1998; Reznitskii et al., 2014) и концентрируется в немагнитной и электромагнитной фракциях, поэтому предложенная методика гарантирует полное извлечение турмалина из проб.

Выделенные зерна турмалина выкладывали рядами, заливали эпоксидной смолой и полировали. Для определения степени окатанности обломочного турмалина и ранее исследованного циркона (Брусницына и др., 2021) была использована шкала Ф.Дж. Петтиджона (Pettijohn, 1975), позволяющая отнести зерна к одной из следующих групп: окатанные, среднеокатанные, угловатые и неокатанные. Определение химического состава турмалина проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром AzTec Energy X-Max 20 (параметры: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 1 нА, время сбора данных 30 с (без учета мертвого времени)). В качестве стандартов были использованы природные и синтетические соединения. Точность определения основных элементов находится в пределах ~3% от фактического количества; для элементов примесей – в пределах ~10%. Химические формулы турмалина были рассчитаны на 15 катионов ($Y + Z + T$) с учетом того, что: (1) содержание бора принято равным 3, (2) в позиции X могут присутствовать вакансии; (3) принято, что все железо двухвалентное. Количество O и OH рассчитано по балансу зарядов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав обломочного турмалина. Проанализирован химический состав 63 зерен турмалина. Наибольшее количество зерен было выделено из пробы паунской свиты (34 зерна, 9034/12), в остальных образцах количество зерен турмалина варьирует от 4 до 6 (табл. 1). Зерна турмалина преимущественно угловатые и неокатанные, включения в них отсутствуют, окраска буровато-зеленая.

Электронно-зондовый микроанализ не выявил признаков зонально-секториального строения индивидов. Согласно полученным данным (табл. 1), все изученные зерна турмалина относятся к щелочной группе: Na (0.52–0.95 к. ф.) значительно преобладает над Ca (<0.26 к. ф.) и K (<0.03 к. ф., рис. 3, а). Для всех изученных зерен турмалина характерно наличие вакансий в позиции X (\square от 0.05 до 0.50 к. ф.). В турмалине из паунской свиты заметно больше Na (0.68–0.97 к. ф.), в то время как для турмалина из остальных свит коэффициент в формуле для Na в среднем 0.60.

По заполнению *W* позиции большинство зерен (56 из 63) относится к гидроксиподгруппе щелочной группы надгруппы турмалина (рис. 3, б), а семь оставшихся – к окси-подгруппе щелочной группы надгруппы турмалина.

Все исследованные зерна турмалина содержат более 6 к. ф. Al^{3+} (табл. 1), что указывает на присутствие алюминия как в *Y*-, так и в *Z*-позиции. Основными октаэдрическими катионами (помимо алюминия) являются магний и железо. При этом, отношение $Mg/(Mg + Fe)$ изменяется от 0.45 до 1.00 (рис. 3, в). Существенных вариаций содержания Ti в исследованных образцах нет. Корректное распределение ионов Mg, Fe, Mn и Ti по двум неэквивалентным октаэдрическим позициям (YO_6 и ZO_6) не может быть установлено достоверно без привлечения данных монокристалльного рентгеноструктурного анализа (Vereshchagin et al., 2018). Однако на основании химического состава мы можем предположить, что большинство изученных зерен (53) по составу соответствуют дравиту, и лишь несколько (5 зерен) отвечают шерлу (рис. 3, в). Еще пять зерен имеют состав, отвечающий оксидравиту.

На петрогенетической диаграмме $Al-Fe_{50}Al_{50}-Mg_{50}Al_{50}$ (Henry, Guidotti, 1985), фигуративные точки составов зерен турмалина попадают преимущественно в два поля, отвечающих метапелитам и метапсаммитам бедным и богатым глиноземом (31 и 24 зерна соответственно; рис. 3, г). Два зерна (визингская и лунвожская свиты) попадают в поле ультрамафитов, низкокальциевых и богатых Sr и V метаосадков, а одно зерно (новобобровская свита) попало в поле богатых Fe кварц-турмалиновых пород, метапелитов и известково-силикатных роговиков.

Степень окатанности обломочных турмалина и циркона. Оценка окатанности обломочного турмалина показала, что в пробах преобладают неокатанные (46%) и угловатые (49%) зерна (рис. 4, а). Количество среднеокатанных зерен не превышает 5%; окатанных зерен в изученных пробах не установлено. При этом для обломочного циркона в этих же пробах характерны среднеокатанные и угловатые зерна (рис. 4, б) (Брусницына и др., 2021). Около 15% от всей популяции зерен циркона имеют окатанный облик. Неокатанный облик с близкой к идиоморфной формой кристаллов имеют только 5% индивидов этого минерала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что турмалин из разных стратиграфических подразделений имеет сходный химический состав, что указывает на единый источник сноса. В образце породы из паунской свиты не обнаружен турмалин с отношением $Mg/(Mg + Fe) < 0.5$ и содержанием вакансий в позиции X > 0.3 к. ф.; в образцах из других свит величина отношения $Mg/(Mg + Fe)$ достигает 1.0, а вакансия в позиции X – до 0.5 к. ф.

Полученные данные о химическом составе обломочного турмалина из докембрийских отложений Среднего Тимана указывают на метаосадочное происхождение материнских пород в источнике сноса. Химический состав изученных минералов свидетельствует о том, что продукты разрушения гранитов (если они были) не являлись источником зерен турмалина. Не было обнаружено и турмалина, источником для которого были бы метакarbonаты или метапироксениты.

Отношение дравит/шерл ($Mg/(Mg + Fe)$; рис. 3, в) указывает возможное метаморфическое происхождение большинства зерен (Kowal-Linka, Stawikowski, 2013). Изу-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) обломочного турмалина из рифейских метатерригенных пород Среднего Тимана
Table 1. Chemical composition (wt %) of detrital tourmaline from Riphean metaterrigenous rocks of the Middle Timan

Компонент	RF ₃ pn (обр. 9034/2)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Na ₂ O	2.45	2.45	2.39	2.34	2.29	2.99	2.41	2.46	
CaO	0.32	0.42	0.47	0.62	0.53	0.62	0.34	0.30	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SiO ₂	37.25	37.03	37.22	36.60	36.46	36.44	37.61	37.22	
Al ₂ O ₃	31.90	31.10	30.45	30.01	30.42	30.07	31.65	30.68	
MgO	7.56	8.28	8.82	8.51	8.47	8.18	8.29	8.60	
TiO ₂	0.74	0.56	1.18	1.37	0.99	1.06	0.82	0.90	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeO	6.13	5.73	5.52	5.82	5.33	6.18	5.85	5.91	
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
H ₂ O	3.67	3.64	3.67	3.62	3.60	3.60	3.71	3.67	
B ₂ O ₃	10.64	10.57	10.63	10.49	10.44	10.43	10.75	10.64	
Сумма	100.65	99.78	100.35	99.38	98.53	99.57	101.42	100.38	
$Y + Z + T = 15$									
<i>X</i>	Ca	0.06	0.07	0.08	0.11	0.09	0.11	0.06	0.05
	Na	0.78	0.78	0.76	0.75	0.74	0.97	0.76	0.78
	K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	□	0.17	0.15	0.16	0.14	0.17	-0.08	0.19	0.17
<i>Y + Z</i>	Al	6.23	6.11	5.95	5.92	6.03	5.97	6.11	5.99
	Ti	0.09	0.07	0.15	0.17	0.12	0.13	0.10	0.11
	Mg	1.84	2.03	2.15	2.10	2.10	2.03	2.00	2.09
	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fe	0.84	0.79	0.75	0.81	0.74	0.86	0.79	0.81
	Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>T</i>	Si	6.09	6.09	6.08	6.06	6.07	6.07	6.08	6.08
	Al	-0.09	-0.09	-0.08	-0.06	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08
<i>V + W</i>	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	OH	3.60	3.73	3.75	3.70	3.72	3.50	3.74	3.83
	O	0.40	0.27	0.25	0.30	0.28	0.50	0.26	0.17
<i>B</i>	B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Mg/(Mg + Fe)		0.69	0.72	0.74	0.72	0.74	0.70	0.72	0.72
□/(□ + Na + K)		0.18	0.16	0.17	0.16	0.18	-0.09	0.20	0.18

Таблица 1. Продолжение

Компонент	RF ₃ пн (обр. 9034/2)								
	9	10	11	12	13	14	15	16	
Na ₂ O	2.49	2.43	2.31	2.14	2.52	2.32	2.54	2.34	
CaO	0.49	0.65	0.56	0.57	0.22	0.42	0.49	0.54	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SiO ₂	37.11	37.06	37.15	36.04	37.24	37.12	37.22	37.54	
Al ₂ O ₃	30.68	30.75	30.42	30.66	31.58	30.88	31.34	30.70	
MgO	8.66	8.66	8.70	7.21	8.18	8.61	8.35	9.19	
TiO ₂	0.96	0.95	1.08	0.81	0.62	0.76	0.88	0.96	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeO	5.51	5.32	5.63	7.16	5.84	5.44	5.61	5.14	
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
H ₂ O	3.66	3.65	3.65	3.58	3.67	3.65	3.67	3.75	
B ₂ O ₃	10.60	10.59	10.60	10.37	10.66	10.60	10.65	10.87	
Сумма	100.16	100.06	100.10	98.54	100.53	99.80	100.76	101.03	
$Y + Z + T = 15$									
<i>X</i>	Ca	0.09	0.11	0.10	0.10	0.04	0.07	0.09	0.09
	Na	0.79	0.77	0.73	0.70	0.80	0.74	0.80	0.74
	K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	□	0.12	0.11	0.17	0.20	0.16	0.19	0.11	0.17
<i>Y + Z</i>	Al	6.01	6.03	5.97	6.09	6.14	6.06	6.10	5.96
	Ti	0.12	0.12	0.13	0.10	0.08	0.09	0.11	0.12
	Mg	2.12	2.12	2.13	1.80	1.99	2.10	2.03	2.22
	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fe	0.76	0.73	0.77	1.00	0.80	0.75	0.77	0.70
	Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>T</i>	Si	6.08	6.08	6.09	6.04	6.07	6.09	6.07	6.09
	Al	-0.08	-0.08	-0.09	-0.04	-0.07	-0.09	-0.07	-0.09
<i>V + W</i>	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	OH	3.71	3.65	3.74	3.76	3.76	3.78	3.64	3.79
	O	0.29	0.35	0.26	0.24	0.24	0.22	0.36	0.21
<i>B</i>	B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Mg/(Mg + Fe)		0.74	0.74	0.73	0.64	0.71	0.74	0.73	0.76
□/(□ + Na + K)		0.13	0.13	0.19	0.23	0.17	0.20	0.12	0.19

Таблица 1. Окончание

Компонент	RF ₂ nb (обр.9020/3)		RF ₂ vn (обр.9048/5)		RF ₂ sv (обр.9016/2)		RF ₂ lv (обр.9007/5)	RF ₂ pz (обр.9064/2)	
	17	18	19	20	21	22	23	24	
Na ₂ O	1.86	2.20	2.35	2.33	2.02	1.80	2.00	1.91	
CaO	0.52	0.39	0.46	0.52	0.00	0.81	0.88	0.66	
K ₂ O	0.00	0.00	0.11	0.12	0.00	0.00	0.00	0.09	
SiO ₂	36.48	36.55	36.20	36.54	36.78	34.85	37.04	36.34	
Al ₂ O ₃	31.15	29.00	31.72	32.12	31.64	30.69	31.57	32.72	
MgO	5.85	6.20	8.23	8.16	5.29	6.21	8.58	6.60	
TiO ₂	1.16	0.96	0.73	0.74	1.08	0.95	0.89	0.93	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeO	8.38	11.99	3.28	3.70	9.49	5.72	4.23	6.35	
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
H ₂ O	3.64	3.65	3.56	3.65	3.62	3.43	3.64	3.63	
B ₂ O ₃	10.57	10.59	10.33	10.58	10.51	9.94	10.57	10.53	
Сумма	99.61	101.53	96.97	98.46	100.43	94.39	99.41	99.75	
$Y + Z + T = 15$									
X	Ca	0.09	0.07	0.08	0.09	0.00	0.15	0.15	0.12
	Na	0.60	0.71	0.77	0.75	0.65	0.61	0.64	0.61
	K	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
	□	0.30	0.23	0.13	0.13	0.35	0.24	0.21	0.25
Y + Z	Al	6.23	5.69	6.38	6.37	6.25	6.42	6.21	6.38
	Ti	0.15	0.12	0.09	0.09	0.13	0.12	0.11	0.12
	Mg	1.46	1.53	2.06	2.02	1.30	1.62	2.10	1.63
	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fe	1.17	1.66	0.46	0.51	1.31	0.84	0.58	0.88
T	Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Si	6.09	6.04	6.09	6.08	6.08	6.09	6.09	6.01
V + W	Al	-0.09	-0.04	-0.09	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09	-0.01
	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	OH	3.60	4.00	3.39	3.41	3.75	3.32	3.54	3.52
B	O	0.40		0.61	0.59	0.25	0.68	0.46	0.48
	B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Mg/(Mg + Fe)	0.55	0.48	0.82	0.80	0.50	0.66	0.78	0.65	
□/(□ + Na + K)	0.34	0.24	0.14	0.14	0.35	0.28	0.25	0.29	

Примечание. RF₂rp (обр. 9034/2) – паунская свита; RF₂nb (обр.9020/3) – новобобровская свита; RF₂vn (обр.9048/5) – визингская свита; RF₂lv (обр. 9007/5) – лунвожская свита; RF₂pz (обр. 9064/2) – пижемская свита.

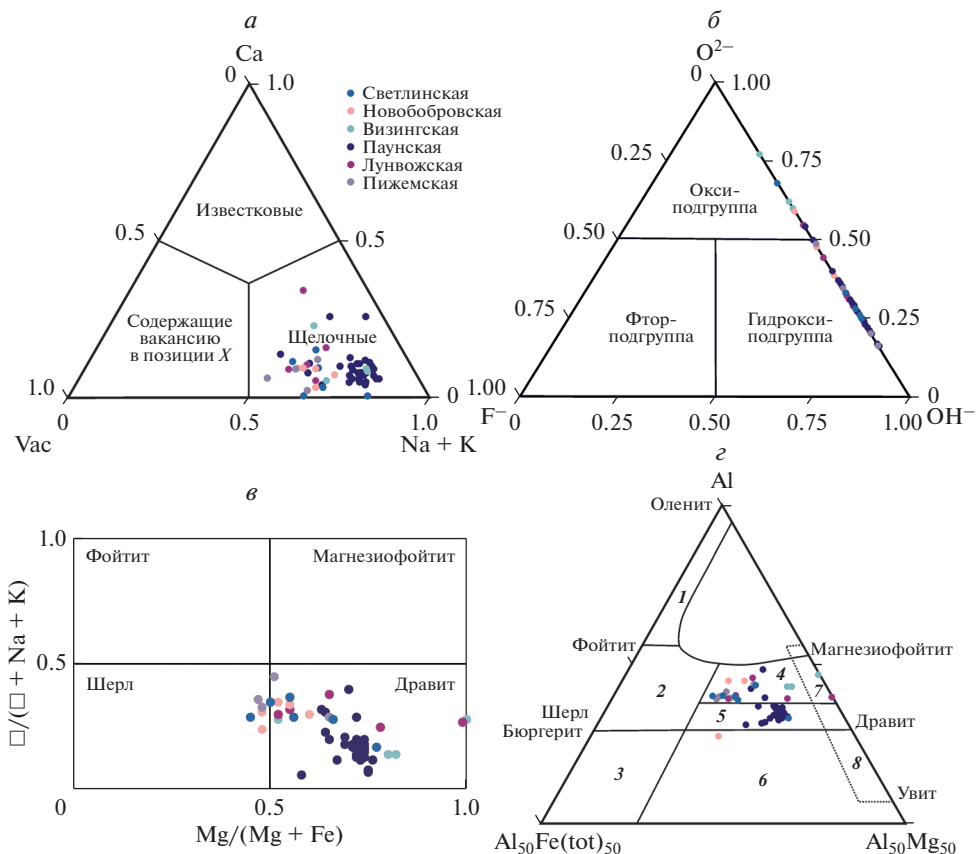


Рис. 3. Химический состав обломочного турмалина: (а) на тройной диаграмме Ca–Na + K–вакансия (Henry et al., 2011), (б) на тройной диаграмме O–OH–F (Henry et al., 2011), (в) на диаграмме значений $\square/(\square + \text{Na} + \text{K})$ и $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ (Henry, Dutrow, 1996), (г) на петрогенетической диаграмме Al–Fe₅₀Al₅₀–Mg₅₀Al₅₀ (Henry, Guidotti, 1985): 1 – богатые Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 2 – бедные Li гранитоиды в ассоциации с аплитами и пегматитами; 3 – богатые Fe³⁺ кварц–турмалиновые породы и гидротермально измененные граниты; 4 – метапелиты и метапсаммиты, насыщенные глиноземом; 5 – метапелиты и метапсаммиты, бедные глиноземом; 6 – богатые Fe³⁺ кварц–турмалиновые породы, метапелиты и известково-силикатный роговик; 7 – ультрамафиты, низкокальциевые и богатые Cr и V метаосадки; 8 – метакarbonаты, метапироксениты.

Fig. 3. Chemical composition of detrital tourmaline: а – X-site vacancy vs. Ca vs. (Na + K) ternary diagram (Henry et al. 2011); б – O–OH–F ternary diagram (Henry et al. 2011); в – $\square/(\square + \text{Na} + \text{K})$ vs. $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ diagram (Henry, Dutrow, 1996); г – in the Al–Fe₅₀Al₅₀–Mg₅₀Al₅₀ ternary diagram (Henry, Guidotti, 1985): 1 – Li-rich granitoid pegmatites and aplites; 2 – Li-poor granitoids and associated pegmatites and aplites; 3 – Fe³⁺-rich quartz–tourmaline rocks (hydrothermally altered granites); 4 – metapelites and metapsammities coexisting with an Al-saturated phase; 5 – metapelites and metapsammities not coexisting with an Al-saturated phase; 6 – Fe³⁺-rich quartz–tourmaline rocks, calc-silicate rocks, and metapelites; 7 – low-Ca metaultramafic and metasedimentary rocks rich in Cr and V; 8 – metacarbonates and metapyroxenites.

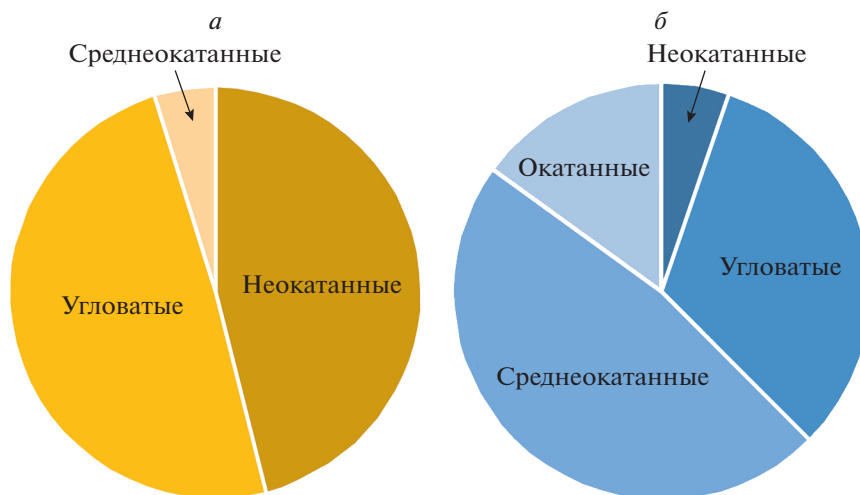


Рис. 4. Диаграмма окатанности зерен обломочного турмалина (*a*), и обломочного циркона (*б*) из исследованных образцов метасадочных пород Среднего Тимана. Классы окатанности приведены по Ф.Дж. Петтиджону (Pettijohn, 1975).

Fig. 4. Diagram of the roundness of grains: *a* – detrital tourmaline, *б* – detrital zircon, from studied samples of metasedimentary rocks of the Middle Timan. The roundness classes are given according to F.J. Pettijohn (1975).

ченные зерна турмалина, вероятно, кристаллизовались при метаморфизме обогащенных бором осадочных пород. Можно предположить, что основным источником турмалина являлись парагнейсы и слюдяные сланцы, преобразованные в условиях до амфиболитовой фации метаморфизма.

Преобладание неокатанных и угловатых зерен турмалина свидетельствует о том, что его зерна не претерпели значительного переотложения, и не являются перемытыми из более древних осадочных комплексов. В то же время, зерна циркона имеют более высокую степень окатанности, что может указывать на неоднократное переотложение в процессе переноса обломочного материала. Это заключение подтверждается и значительным разбросом значений возраста обломочного циркона (Брусницына и др., 2021). Турмалин, в сравнении с цирконом, является менее устойчивым минералом в процессе транспортировки (Morton, Hallsworth, 1999). Неокатанный облик его зерен указывает на то, что они не претерпели многократного переотложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Небольшое количество зерен обломочного турмалина из рифейских терригенных отложений, проанализированных в данном исследовании, вероятнее всего обусловлено их малым количеством (в сравнении с цирконом) в материнских породах. U-Pb датирование обломочного циркона ранее показало, что источниками поступления обломочного материала в осадочный бассейн рифея Среднего Тимана служили террейны входящие в состав Свеконорвежско-Гренвильского орогена (Lorenz et al., 2012; Андреев и др., 2013, 2014; Удоратина и др., 2017; Соболева и др., 2019). Это предположение подтверждается сходным распределением значений возраста обломочного циркона для средне- и верхнерифейских отложений Северного, Среднего, Южного Тимана, Северного и Южного Урала (Кузнецов и др., 2010; Андреев и др., 2013, 2014; Петров и др., 2015; Удоратина и др., 2017; Маслов и др., 2018а, 2018б; Соболева и др., 2019), что, вероятно,

указывает на крупную орогенную систему, выступавшую источником сноса для обширных территорий Балтики в среднем и позднем рифее. Х. Лоренц с соавторами (Logenz et al., 2012) предположили, что Свеконорвежско-Гренвильский ороген был развит значительно шире, чем его современные выходы на дневную поверхность и, вероятно, протягивался далеко на восток и на север (в современных координатах). При этом, зерна обломочного циркона с возрастом, близким к возрасту седиментации и, соответственно, к возрасту синколизационных гранитов Свеконорвежского орогена, немногочисленны во всех перечисленных регионах (Удоратина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др., 2021 и др.). Это позволило сделать предположение (Брусницына и др., 2021), что основными источниками сноса для формирования пород рифейского возраста Среднего Тимана выступали древние метаморфические и магматические комплексы, входящие в состав орогена. Наши новые данные по химическому составу турмалина подтверждают это предположение и свидетельствуют о том, что метаморфические комплексы являлись значимым источником обломочного материала в среднем и позднем рифее Тимана. Более того, среди метаморфических пород, вероятно, преобладали гнейсы и сланцы, имевшие первичную осадочную природу. Это хорошо согласуется с широким разбросом значений возраста обломочного циркона в изученных толщах и может свидетельствовать об их переотложении из более древних осадочных и метаосадочных комплексов.

Авторы благодарят ресурсный центр СПБГУ “Геомодель” за помощь в проведении аналитических исследований, а также анонимного рецензента, чьи замечания позволили значительно улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреичев В.Л. Изотопная геохронология интрузивного магматизма Северного Тимана. Екатеринбург: Институт геологии, **1998**. 81 с.

Андреичев В.Л., Соболева А.А., Герелс Дж. U–Pb-возраст детритовых цирконов из верхнедокембрийских терригенных отложений Северного Тимана // Докл. РАН. **2013**. Т. 450. № 5. С. 562–566.

Андреичев В.Л., Соболева А.А., Герелс Дж. U–Pb возраст и источники сноса обломочных цирконов из верхнедокембрийских отложений Северного Тимана // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2014**. Т. 22. № 2. С. 32–45.

Брусницына Е.А., Ершова В.Б., Худoley А.К., Андерсон Т., Маслов А.В. Возраст и источники сноса пород четласской серии Среднего Тимана по результатам U–Th–Pb (LA-ICP-MS) датирования обломочных цирконов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2021**. Т. 29. № 6. С. 1–23.

Гецен В.Г. Тектоника Тимана. Л.: Наука, **1987**. 172 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-39–Нарьян-Мар / Ред. К.Э. Яковсон. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, **2015**. 435 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000 (второе поколение). Серия Тиманская. Лист Q-39 – XXXIII, XXXIV (Тиман) / Ред. А.Ю. Вовшина. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, **2020**. 320 с.

Кузнецов Н.Б., Натапов Л.М., Белоусова Е.А., Гриффин У.Л., О’Рейлли С.О., Куликова К.В., Соболева А.А., Удоратина О.В. Первые результаты U–Pb датирования и изотопно-геохимического изучения детритных цирконов из позднекембрийских песчаников Южного Тимана (Увал Джежим-Парма) // Докл. РАН. **2010**. Т. 435. № 6. С. 798–805.

Маслов А.В., Ерохин Е.В., Гердес А., Ронкин Ю.Л., Иванов К.С. Первые результаты U–Pb LA-ICP-MS-датирования обломочных цирконов из аркозовых песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея (Южный Урал) // Докл. РАН. **2018а**. Т. 482. № 5. С. 558–561.

Маслов А.В., Петров Г.А., Ронкин Ю.Л. К реконструкции состава пород – источников сноса для средне- и верхнерифейских отложений Ишемского и Башкирского антиклинориев (Урал) // Геохимия. **2018б**. № 5. С. 410–426.

Оловянишников В.Г. Верхний докембрий Тимана и полуострова Канин. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, **1998**. 163 с.

Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Гердес А., Маслов А.В. Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов из метапесчаников Ишеримского антиклинория (Северный Урал) // Докл. РАН. **2015**. Т. 464. № 5. С. 589–593.

Соболева А.А., Андреичев В.Л., Бурцев И.Н., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б., Соболев И.Д. Детритовые цирконы из верхнедокембрийских пород вымской серии Среднего Тимана: U-Pb возраст и источники сноса // Бюлл. МОИП, Отд. Геол. **2019**. Т. 94. № 1. С. 3–16.

Удортатина О.В., Бурцев И.Н., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б. Возраст метапесчаников верхнедокембрийской четласской серии Среднего Тимана на основании U-Pb датирования детритных цирконов // Бюлл. МОИП, Отд. Геол. **2017**. Т. 92. № 5. С. 15–32.

Detrital Tourmaline from the Riphean Terrigenous Deposits of the Middle Timan: Chemical Composition and Genesis

E. A. Brusnitsyna^{a, *}, O. S. Vereshchagin^{b, **}, and V. B. Ershova^{b, c, ***}

^aKarpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia

^bSt. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

^cGeological Institute RAS, Moscow, Russia

*e-mail: brusnitsyna@yandex.ru

**e-mail: o.vereshchagin@spbu.ru

***e-mail: v.ershova@spbu.ru

Data on the chemical composition and the degree of roundness of detrital tourmaline from the Chetlaskaya, Bystrinskaya, Vymskaya, and Kislorucheyeskaya group of Upper Precambrian metaterrigenous rocks of the Middle Timan are presented. Fragments of the studied tourmaline crystals are predominantly homogeneous (without visible concentric and sectorial zoning) and belong to the alkaline group and hydroxy subgroup (dravite and shorl) of the tourmaline supergroup. The similarity in chemical compositions indicates a single source of fragments of this mineral for all studied Riphean sedimentary rocks within the studied region, and the low degree of roundness indicates the proximity of the primary source. Comparison of tourmaline with associated detrital zircon made it possible to conclude that the source of clastic material for the formation of metaterrigenous rocks of the Upper Precambrian in the Middle Timan was metamorphic complexes in the terrains of the Grenvillian-Sveconorwegian Orogen.

Keywords: Middle Timan, Riphean, tourmaline, zircon, heavy minerals

REFERENCES

- Andreichev V.L. Isotope Geochronology of Intrusive Magmatism in Northern Timan. Ekaterinburg: Institute of Geology, **1998**. 81 p. (in Russian).
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Gehrels G.E. U-Pb age of detrital zircons from the Upper Precambrian Terrigenous Section of North Timan. *Doklady Earth Sci.* **2013**. Vol. 450. N 2. P. 592–596)
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Gehrels G. U-Pb Dating and provenance of detrital zircons from the Upper Precambrian deposits of North Timan. *Stratigraphy and Geological Correlation.* **2014**. Vol. 22. N. 2. P. 147–159.
- Arif M., Henry D.J., Moon C.J. Cr-bearing tourmaline associated with emerald deposits from Swat, NW Pakistan: Genesis and its exploration significance. *Amer. Miner.* **2010**. Vol. 95. N 5–6. P. 799–809.
- Baksheev I.A., Kudryavtseva O.E. Nickeliferous tourmaline from the Berezovskoe gold deposit, Middle Urals, Russia. *Canad. Miner.* **2004**. Vol. 42. N 4. P. 1065–1078.
- Berryman E.J., Zhang D., Wunder B., Duffy T.S. Compressibility of synthetic Mg-Al tourmalines to 60 GPa. *Amer. Miner.* **2019**. Vol. 104. N 7. P. 1005–1015.
- Biernacka J. Insight into diagenetic processes from authigenic tourmaline: An example from Carboniferous and Permian siliciclastic rocks of western Poland. *Sedimentary Geol.* **2019**. Vol. 389. P. 73–90.
- Biernacka J. Provenance of Upper Cretaceous quartz-rich sandstones from the North Sudetic Synclorium, SW Poland: constraints from detrital tourmaline. *Geol. Quarter.* **2012**. Vol. 56. N. 2. P. 315–332.
- Bosi F., Reznitskii L., Skogby H. Oxy-chromium-dravite, NaCr₃(Cr₄Mg₂)(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₃O, a new mineral species of the tourmaline supergroup. *Amer. Miner.* **2012**. Vol. 97. N 11–12. P. 2024–2030.

- Brusnitsyna E.A., Ershova V.B., Khudoley A.K., Andersen T., Maslov A.V.* Age and provenance of rock removal from the Chetlas Group of the Middle Timan based on the results of U–Th–Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2021**. Vol. 29. N 6. P. 607–626.
- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B.* Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*. **2012**. Vol. 40. N 10. P. 875–878.
- Coutts D.S., Matthews W.A., Hubbard S.M.* Assessment of widely used methods to derive depositional ages from detrital zircon populations. *Geoscience Frontiers*. **2019**. Vol. 10. N. 4. P. 1421–1435.
- Dickinson W.R.* Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *J. Sediment. Petrol.* **1970**. Vol. 40. N. 2. P. 695–707.
- Dickinson W.R., Gehrels G.E.* Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2009**. Vol. 288. P. 115–125.
- Ertl A., Marshall H.R., Giester G., Henry D.J., Schertl H.-P., Ntaflou T., Luvizotto G. L., Nasdala L., Tillmanns E.* Metamorphic ultrahigh-pressure tourmaline: structure, chemistry, and correlations to P-T conditions. *Amer. Mineral.* **2010**. Vol. 95. N 1. P. 1–10.
- Fedo C.M., Sircombe K.N., Rainbird R.H.* Detrital zircon analysis of the sedimentary record. In: *Zircon*. Ed. by Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. Berlin, Boston: De Gruyter, **2003**. P. 277–304.
- Gehrels G.* Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: *Tectonics of Sedimentary Basins*. Ed. by Busby C., Azor A. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, **2012**. P. 45–62.
- Gehrels G.* Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **2014**. Vol. 42. N. 1. P. 127–149.
- Getsen V.G.* Timan's Tectonics. Leningrad: Nauka, **1987**. 172 p. (in Russian).
- Henry D.J., Dutrow B.L.* Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. *Rev. Miner.* **1996**. Vol. 33. P. 503–558.
- Henry D.J., Guidotti C.V.* Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Amer. Miner.* **1985**. Vol. 70. P. 1–15
- Henry D.J., Novak M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F.* Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *Amer. Miner.* **2011**. Vol. 96. N. 5. 895–913.
- Johnstone S.A., Schwartz T.M., Holm-Denoma C.S.* A Stratigraphic approach to inferring depositional ages from detrital geochronology data. *Front. Earth Sci.* **2019**. Vol. 7. P. 1–9.
- Kooijman E., Mezger K., Berndt J.* Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2010**. Vol. 293. N 3. P. 321–330.
- Kowal-Linka M., Stawikowski W.* Garnet and tourmaline as provenance indicators of terrigenous material in epicontinental carbonates (Middle Triassic, S Poland). *Sediment. Geol.* **2013**. Vol. 291. P. 27–47.
- Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A., Griffin U.L., O'Reilly S.Y., Kulikova K.V., Soboleva A.A., Udoratina O.V.* The first results of U/Pb dating and isotope geochemical studies of detrital zircons from the Neoproterozoic sandstones of the Southern Timan (Djejjim-Parma Hill). *Doklady Earth Sci.* **2010**. Vol. 435. N 2. P. 1676–1683.
- Lorenz H., Gee D.G., Larionov A.N., Majka J.* The Grenville–Sveconorwegian orogen in the high Arctic. *Geol. Mag.* **2012**. Vol. 149. N 5. P. 875–891.
- Maslov A.V., Erokhin Yu.V., Gerdes A., Ronkin Yu.L., Ivanov K.S.* First Results of U-Pb LA-ICP-MS isotope dating of detrital zircons from arkose sandstone of the Biryann Subformation of Zilmerdak Formation (Upper Riphean, South Urals). *Doklady Earth Sci.* **2018**. Vol. 482. N 2. C. 1275–1277.
- Maslov A.V., Petrov G.A., Ronkin Yu.L.* Reconstruction of Source-Rock Composition of the Middle and Upper Riphean Rocks of the Isherim and Bashkir Anticlinoria, Urals. *Geochem. Int.* **2018**. Vol. 56. N 5. P. 403–418.
- Morton A.C., Hallsworth C.R.* Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment. Geol.* **1999**. Vol. 124. P. 3–29.
- Olovyanishnikov V.G.* Upper Precambrian Timan and Kanin Peninsula. Ekaterinburg: UB RAS, **1998**. 163 p. (in Russian).
- Petrov G. A., Ronkin Y.L., Gerdes A., Maslov A.V.* First Results of U-Pb (LA-ICP-MS) Dating of detrital zircons from metasandstones of the Ischem Anticlinorium (Northern Urals). *Doklady Earth Sci.* **2015**. Vol. 464. N 5. P. 589–593.
- Reznitskii L., Clark C.M., Hawthorne F.C., Skogby G.H., Halenius U., Bosi F.* Chromo-alumino-povondraite, NaCr₃(Al₄Mg₂)(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₃O, a new mineral species of the tourmaline supergroup. *Amer. Miner.* **2014**. Vol. 99. N 8–9. P. 1767–1773.
- Selway J., Novák M., Hawthorne F., Cerny P., Ottolini L.* Rossmanite, □ (LiAl₂)Al₆(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₄, a new alkali-deficient tourmaline: description and crystal structure. *Amer. Miner.* **1998**. Vol. 83. P. 896–900.
- Soboleva A.A., Andreichev V.L., Burtsev I.N., Nikulova N.Yu., Khubanov V.B., Sobolev I.D.* Detrital zircons from upper Precambrian rocks of the Vym Group of Middle Timan (U-Pb Age and Provenance). *Bull. Moscow Soc. Naturalists, Dep. Geol.* **2019**. Vol. 94. N 1. P. 3–16 (in Russian).

State geological map of the Russian Federation 1: 1 000 000 (third generation). Sheet Q-39 (Naryan-Mar). Explanatory letter. Ed. by K. Ed. Jacobson. Saint Petersburg: VSEGEI, **2015**. 435 p. (*in Russian*).

State geological map of the Russian Federation 1: 200 000 (second generation). Sheet Q-39-XXXIII, XXXIV (Timan). Ed. by A.Yu. Vovshina. Saint Petersburg: VSEGEI, **2020**. 320 p. (*in Russian*).

Triebold S., von Eynatten H., Zack T. A Recipe for the Use of rutile in sedimentary provenance analysis. *Sediment. Geol.* **2012**. Vol. 282. P. 268–275.

Trumbull R.B., Krienitz M.-S., Gottesmann B., Wiedenbeck M. Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from an S-type granite and its source rocks: The Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia. *Contrib. Miner. Petrol.* **2007**. Vol. 155. N 1. P. 1–18.

Udoratina O.V., Burtsev I.N., Nikulova N.Yu., Khubanov V.B. Age of Upper Precambrian metasandstones of Chetlas Group of Middle Timan on U-Pb dating of detrital zircons. *Bull. Moscow Soc. Naturalists, Dep. Geol.* **2017**. Vol. 92. N 5. P. 15–32 (*in Russian*).

van Hinsberg V.J., Henry D.J., Dutrow B.L. Tourmaline as a petrologic forensic mineral: A Unique recorder of its geologic past. *Elements.* **2011**. Vol. 7. N 5. P. 327–332.

Vďačný M., Bačík P. Provenance of the Permian Malužiná Formation sandstones (Malé Karpaty Mountains, Western Carpathians): evidence of garnet and tourmaline mineral chemistry. *Geologica Carpathica.* **2015**. Vol. 66. N 2. P. 83–97.

Vereshchagin O.S., Khudoley A.K., Ershova V.B., Prokopiev A.V., Schneider G.V. Provenance of Jurassic-Cretaceous siliciclastic rocks from the northern Siberian Craton: an integrated heavy mineral study. *J. Geosci.* **2018**. Vol. 63. P. 199–213.

Zhang W., Roberts D., Pease V. Provenance characteristics and regional implications of Neoproterozoic, Timanian-margin successions and a basal Caledonian nappe in northern Norway. *Precamb. Res.* **2015**. Vol. 268. P. 153–167.

Zhang W., Roberts D., Pease V. Provenance of sandstones from Caledonian nappes in Finnmark, Norway: Implications for Neoproterozoic–Cambrian palaeogeography. *Tectonophysics.* **2016**. Vol. 691. P. 198–205.