

# ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 552.51 (234.82)

## Характеристики метапесчаников светлинской свиты – субстрата щелочных рудных метасоматитов (Октябрьское рудное поле, Средний Тиман)

О.В. Удоратина<sup>a,b</sup>, Н.Ю. Никулова<sup>a</sup>, И.А. Губарев<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: udoratina@geo.komisc.ru

<sup>b</sup>Томский государственный университет

634050, г. Томск, ул. Ленина, 36

<sup>c</sup>Казанский федеральный университет

Институт геологии и нефтегазовых технологий

420008, Казань, ул. Кремлевская, д.4/5. E-mail: i.gubarev2014@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 21 февраля 2020 г.)

Рассмотрены характеристики метапесчаников светлинской свиты, развитых в пределах Октябрьского рудного поля на Четласском Камне (Средний Тиман) и служащих субстратом рудных щелочных метасоматитов. Основным источником обломочного материала при формировании полевошпат-кварцевых мелкозернистых метапесчаников были метаосадочные и, в меньшей степени, кислые магматические породы, в том числе измененные в коре выветривания. Образование песчаников проходило в относительно стабильных тектонических условиях пассивной континентальной окраины.

Ключевые слова: *метапесчаники, пассивная континентальная окраина, Средний Тиман.*

DOI: 10.17072/psu.geol.19.2.152

Октябрьское рудное поле входит в состав Косьюской группы комплексных редкометалльно-редкоземельных проявлений, расположенных на возвышенности Четласский Камень Среднего Тимана, и отличается широким развитием иттриевой (ксенотимовой) минерализации.

Породы рудного поля, расположенного в верховье р. Светлая, представлены слабо метаморфизованными песчаниками светлинской свиты четласской серии, их фенитизированными разностями и образованиями жильного комплекса.

Проведены комплексные исследования пород рудного поля, опробованных в 2016 г. (отряд ИГ Коми НЦ УрО РАН) при тематических исследованиях рудных редкометалльно-редкоземельных образований. В КазФУ (г. Казань) изучены шлифы. Данные

о химическом составе пород получены на базе ЦКП «Геонаука» (г. Сыктывкар) с помощью классического химического и рентгенофлуоресцентного (спектрометр XRF-1800 фирмы SHIMADZU) анализов. Химический состав минералов изучался на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-MAX Oxford Instruments. В ЦЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) методом ICP MS определены редкие и редкоземельные элементы.

Осадочные толщи *светлинской свиты* четласской серии формировались в средне-позднерифейское время (Удоратина и др., 2017; Брусницына и др., 2019). Образования светлинской свиты представлены темно-серыми кварц-хлорит-серицитовыми и биотит-хлорит-кварц-серицитовыми, иногда из-

вестковистыми сланцами, переслаивающимися с разномерными кварцитами и кварцитопесчаниками. По преобладанию сланцев в нижней части разреза и кварцитопесчаников в верхней светлинская свита разделена на нижнюю и верхнюю подсвиты. Мощность светлинской свиты 600 – 620 м. Она согласно, местами с размывом, перекрывается песчаниками новобобровской свиты.

К неизменным вторичными процессами кварцитопесчаникам отнесены породы периферических частей рудных тел, отобранных в канавах, пересекающих вкост рудное поле: обр. ОМ9-16, ОМ10в-16, ОМ10г-16, ОМ10д-16, ОМ10ж-16, ОМ10е-16, ОМ12-16, и скважине – обр. 834.

Мелкозернистые полевошпат-кварцевые метапесчаники с гранобластовой структурой и поровым или контактовым хлорит-серицитовым цементом сложены различной окатанности зернами кварца и полевого шпата, часто с регенерационными каймами (рис. 1).

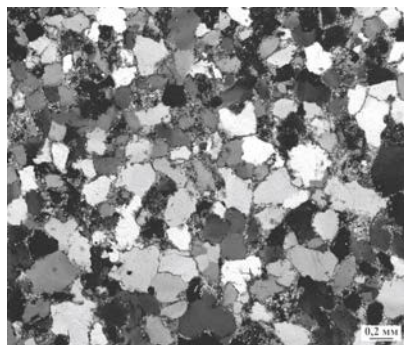


Рис. 1. Микроструктура и минеральный состав метапесчаников, николи скрещены

Нормативный пересчет химического состава показал, что метапесчаники состоят (мас. %) из кварца (83–91), кислого плагиоклаза (6–7), калиевого полевого шпата (3.3–7.8), хлорита (3), магнетита (2) и ильменита (0.3).

На диаграмме  $K_2O-Na_2O$  (Петтиджон и др., 1976) фигуративные точки метапесчаников находятся в поле аркозов (рис. 2, а). На диаграмме  $\log(Fe_2O_{3общ}/K_2O) - \log(SiO_2/Al_2O_3)$  (рис. 2, б) они попали в поля субаркозов, сублититов и кварцевых аренитов. Такое положение точек отражает присутствие в песчаниках хорошо сохранившихся полевых шпатов.

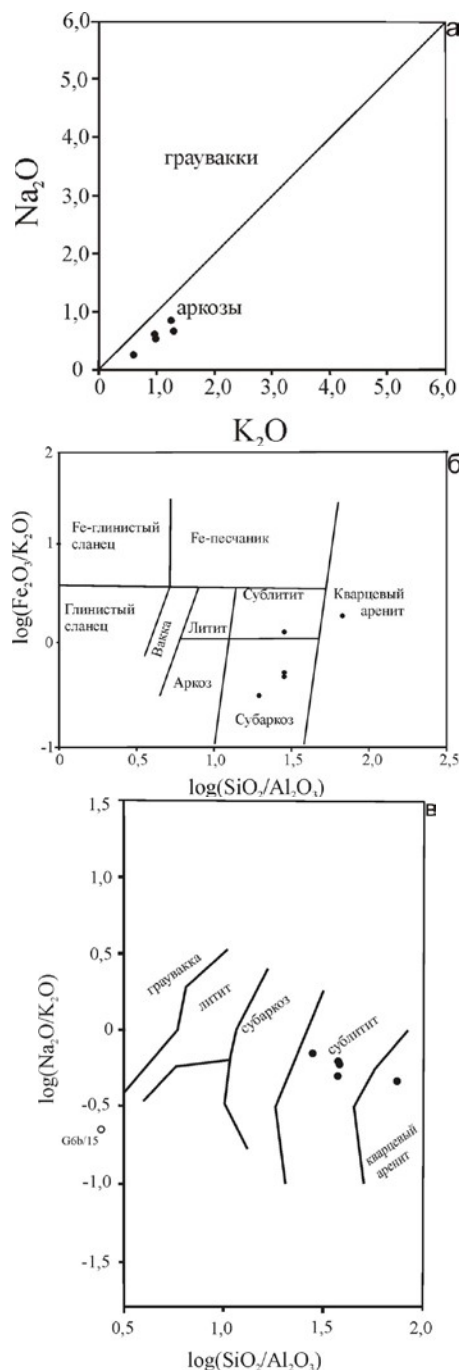


Рис. 2. Классификационные диаграммы: а –  $K_2O - Na_2O$  (по Петтиджон и др., 1976); б –  $\log(Fe_2O_{3общ}/K_2O) - \log(SiO_2/Al_2O_3)$  (по Herron, 1988); в –  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$  (по Петтиджон и др., 1976)

На диаграмме  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$ , разделяющей метапесчаники по соотношению кварца, полевых шпатов и глиноземистого цемента, фигуративные точки попадают в поля сублититов и кварцевых аренитов (рис. 2, в). Считается, что отрицательные

значения  $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  при  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) > 1.7$  указывают на высокую степень зрелости метапесчаников (Петтиджон и др., 1976). Такие характеристики имеет лишь один образец (обр. 834, табл. 1). Для четырех образцов этот показатель существенно ниже, что отражает щелочную спецификацию пород.

По значениям гидролизатного модуля ( $\text{ГМ}=0.5-0.7$ ) все метапесчаники относятся к типу суперсиллитов – преимущественно кварцевых аквагенных пород (рис. 3, а). Величина модуля нормированной щелочности НКМ =  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (коэффициент Миддлтона (Middleton, 1960) превышает 0.31, что, по мнению Я.Э. Юдовича и М. П. Кетрис (Юдович, Кетрис, 2000), свидетельствует о наличии в породе неизменно-го калиевого полевого шпата (рис. 3, б). Низкие значения титанового модуля для супесиллитов могут указывать на то, что формирование состава первичных песчаников в значительной степени проходило за счет размыва и переотложения продуктов разрушения кислых вулканитов.

Индексы выветривания CIW (Herron, 1988) четырех образцов метапесчаников составляют 66–74 и соответствуют средней степени разложения исходных пород, а для обр. 834 CIW=59, что типично для пород, слабо измененных выветриванием (табл. 1).

Индекс изменения состава ICV (Cox, Lowe, 1995) превышает пороговое значение 1, характерное для незрелого обломочного материала (табл. 1). На диаграмме ICV–CIA (Lee, 2002), отражающей изменение соотношения гранитной и базальтовой составляющей и степень зрелости обломочного материала, две фигуративные точки занимают промежуточное положение между линиями, соответствующими составам размываемых основных и кислых пород, две точки тяготеют к составам гранитов и одна (обр. 834) – к слабо измененным базальтам (рис. 4).

Значение соотношения Fe/Mn (Розен и др., 1994), используемого в качестве фациального индикатора для осадочных отложений, в обр. 834 составляют 40 и соответствует мелководным морским отложениям (табл. 1). Для четырех образцов метапесчаников значения этого индикаторного соотношения соответствуют породам, образова-

ние которых проходило в прибрежно-морских условиях.

Таблица 1. Химический состав пород, мас. %

Компоненты	№ образца				
	834	ОМ9-16	ОМ10 в-16	ОМ10 д-16	ОМ10 е-16
SiO <sub>2</sub>	92.24	91.26	90.36	92.48	92.27
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.01	0.13	0.01	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	3.26	4.7	3.26	3.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7	0.22	0.17	0.23	0.00
FeO	3.27	1.13	1.1	1.13	1.5
MnO	0.09	<0.01	0.01	<0.01	0.01
CaO	0.27	<0.5	0.15	<0.5	<0.1
MgO	0.22	0.17	0.56	0.17	0.33
K <sub>2</sub> O	0.61	0.97	1.26	0.97	1.3
Na <sub>2</sub> O	0.29	0.59	0.87	0.59	0.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.024	0.02	0.01	0.02	0.01
ппп	0.3	0.37	0.67	0.37	0.6
Сумма	99.80	98.12	100.00	98.12	100.00
H <sub>2</sub> O	0.09	0.09	0.2	0.09	0.27
CO <sub>2</sub>	0.17	0.09	0.09	0.09	0.09
Геохимические модули и соотношения					
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.9	1.56	2.13	1.56	1.98
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	2.10	1.64	1.45	1.64	1.9
ГМ	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
ФМ	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02
ТМ	0.064	0.003	0.028	0.003	0.015
НКМ	0.66	0.48	0.45	0.48	0.60
$\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$	-0.32	-0.22	-0.16	-0.22	-0.28
$\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$	1.83	1.45	1.28	1.45	1.45
$\log(\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{общ}}/\text{K}_2\text{O})$	0.06	-0.65	-0.87	-0.63	-0.11
F1	-3.22	-2.97	-2.90	-3.03	-3.26
F2	-2.27	-0.41	-0.57	-0.93	-2.01
CIA	46	54	60	54	56
CIW	59	66	73	66	74
ICV	2.01	1.023	1.02	1.03	1.24
Fe/Mn	40	121	116	121	192
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.45	0.30	0.27	0.30	0.40

Примечание: обр. 834, ОМ9-16 и ОМ10д-16 – классический химический, ОМ10в-16, ОМ10е-16 – рентгенофлуоресцентный (РФА) анализы.

F1=0.303–0.447SiO<sub>2</sub>–0.972 TiO<sub>2</sub>+0.008Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–2.67

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.208 FeO–3.082MnO

+0.14MgO+0.195CaO+0.719Na<sub>2</sub>O–

0.032K<sub>2</sub>O+7.51P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

F2=43.57–0.421SiO<sub>2</sub>+1.988TiO<sub>2</sub>–0.526Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–

0.551Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–1.61FeO+2.72MnO+ 0.881 MgO–

0.907CaO–0.177Na<sub>2</sub>O–1.84K<sub>2</sub>O+7.244P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

F3=30.638TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–

12.54Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>общ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+7.329MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+12.031NaO/

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+35.402K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–6.382;

$$F4 = 56.5TiO_2 / Al_2O_3 - 10.897 Fe_2O_{3общ} / Al_2O_3 + 30.875 MgO / Al_2O_3 - 5.404 Na_2O / Al_2O_3 + 11.112 K_2O / Al_2O_3 - 3.89$$

$$M = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2;$$

$$HKM = N_2O + K_2O / Al_2O_3$$

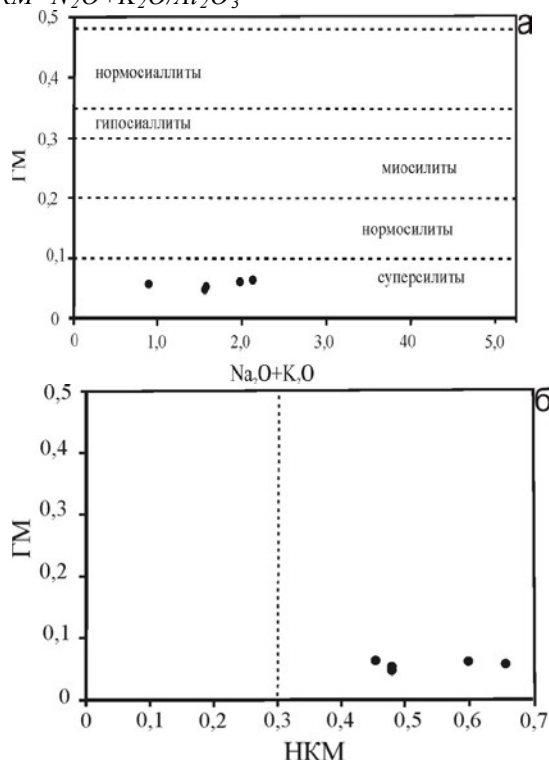


Рис. 3. Модульные диаграммы: а –  $Na_2O+K_2O$ ; б –  $G/M-HKM$  (по Юдович, Кетрис, 2000)

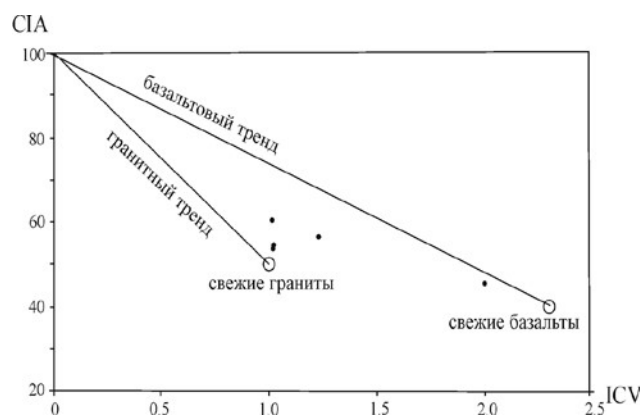


Рис. 4. Положение фигуративных точек песчаников на диаграмме  $ICV-CIA$  (по Nesbitt, Young, 1982)

Относительно высокие значения отношения  $K_2O/Al_2O_3$  (Сох, Lowe, 1995) 0.27–0.45 (табл. 2), отражающего степень переработки материала в области размыва, указывают на слабое изменение процессами химического выветривания размываемых пород.

Для установления связи между химическим составом метапесчаников и обстанов-

ками осадконакопления использовано три дискриминационных диаграммы, при построении которых учитывается максимальное количество оксидов и их отношений. На всех диаграммах фигуративные точки составов попали в поля пассивных континентальных окраин (рис. 5).

Таблица 2. Содержание редких и редкоземельных элементов в породах, г/т

Элемент	ОМ9-16	ОМ10д-16	834
Sc	2.03	1.88	0
V	5.99	<2.5	5.64
Cr	80.6	7.28	22.1
Co	2.18	1.07	4.2
Ni	9.19	6.48	29.4
Cu	47.5	29.9	30.3
Zn	34.2	22.7	51.3
Ga	3.48	2.94	2.33
Rb	23.4	24.1	15
Sr	9.05	5.63	7.51
Y	9.76	8.43	10.1
Zr	76.8	81.7	124
Nb	2.18	44.6	14.5
Ba	105	73.4	42.5
La	10.3	10.8	8.66
Ce	22	23.4	19
Pr	2.56	2.81	2.24
Nd	10.2	11.3	9.24
Sm	2.02	2.67	3
Eu	0.41	0.69	0.73
Gd	1.97	2.37	2.45
Tb	0.32	0.34	0.32
Dy	1.78	1.65	1.86
Ho	0.35	0.3	0.35
Er	0.91	0.86	0.99
Tm	0.13	0.13	0.14
Yb	0.85	0.88	1.03
Lu	0.12	0.15	0.14
Hf	2.12	2.07	3.17
Ta	0.16	0.13	0.21
Pb	4.5	5.76	41.1
Th	3.7	66.6	15.5
U	0.56	0.72	0.65

Содержание РЗЭ в метапесчаниках достаточно высокое – составляет  $(\sum_{(La-Lu)}G/T)$  ОМ9-

16 (50), ОМ10д-16 (55), 834 (44). Спектры РЗЭ трех образцов песчаников однородны, характеризуются слабо выраженным европиевым минимумом (рис. 6),  $Eu/Eu^*$  ОМ9-16 (0.6), ОМ10д-16 (0.8), 834 (0.8), и заметным преобладанием легких редких земель над тяжелыми  $(La/Yb)_n$  ОМ9-16 (8.2), ОМ10д-16 (8.3), 834 (5.7).

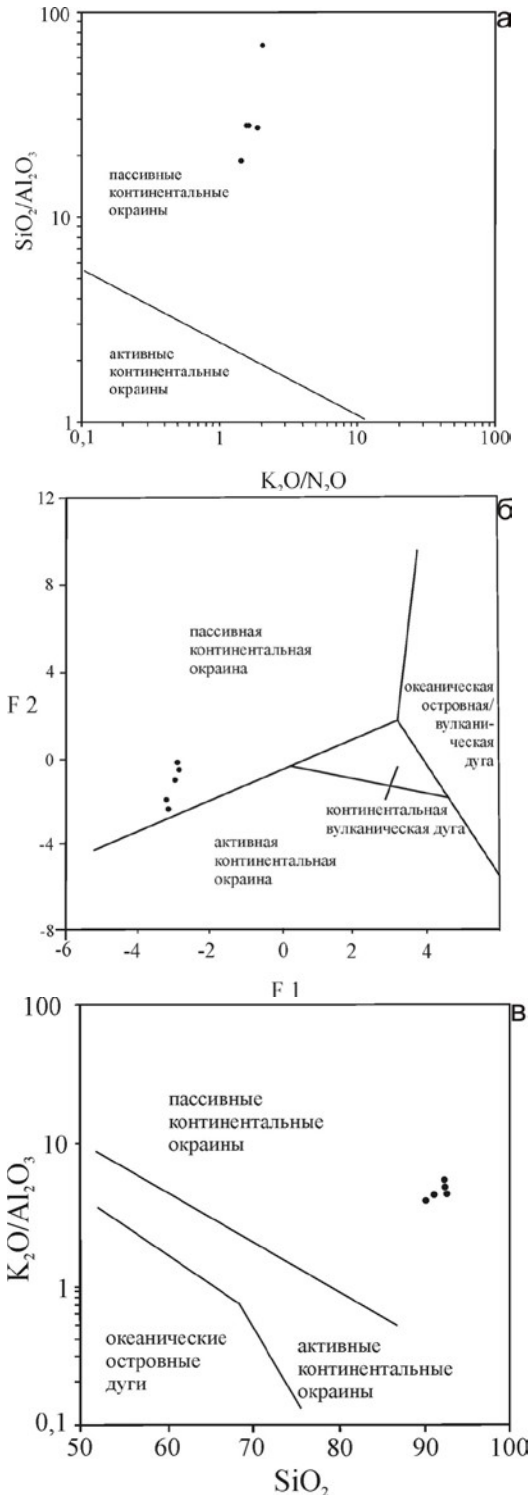


Рис. 5. Положение фигуративных точек составов песчаников на диаграмме: А –  $SiO_2/Al_2O_3$ –

$K_2O/Na_2O$  (no Maynard et al., 1982); б –  $F1-F2$  (no Bhatia, 1983) в –  $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$  (no Roser, Korsch, 1986)

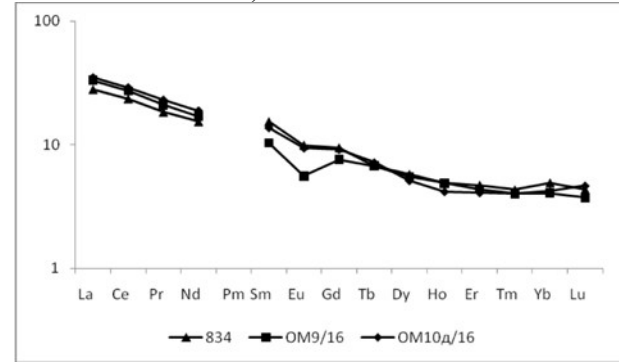


Рис. 6. Спектры распределения РЗЭ метапесчаников, нормализованные по CI

«Наследованный» тип спектров свидетельствует о присутствии в составе песчаников продуктов разрушения неизмененных выветриванием кислых магматических пород и/или кислой вулканокластики.

Повышенная концентрация Th, возможно, обусловлена присутствием Th-монацита, вероятно, еще в исходных песчаниках, что может быть вызвано спецификой состава размываемых кислых пород. Повышенное содержание Рb может быть связано с присутствием сульфидов свинца.

Основным источником обломочного материала в полевошпат-кварцевых метапесчаниках светлинской свиты, развитых в пределах Октябрьского рудного поля, были метаосадочные и, в меньшей степени, кислые магматические породы, в том числе измененные в коре выветривания. Образование метапсаммитов проходило в относительно стабильных тектонических условиях пассивной континентальной окраины.

Исследования выполняются в рамках госзадания № ГР АААА-А17-117121270035-0.

**Библиографический список**

Брусницына Е.А., Ершова В.Б., Худoley А.К., Андресен Т. Результаты исследований U-Pb возраста обломочных цирконов из средне-позднерифейских отложений Четласского Камня (Тиманской гряды) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: матер. 28-й научной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2019. С. 7–11.



Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 536 с.

Розен О. М., Журавлев Д. З., Ляпунов С. М. Геохимические исследования осадочных отложений Тимано-Печерской провинции // Разведка и охрана недр. 1994. № 1. С. 18–21.

Удоратина 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 // Бюл. моск. испытателей природы. Отд. геол. 2017. Вып. 5. С. 15–32.

Юдович Я.Э., Кемпис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemic composition of sandstones // J. Geol. 1983. Vol. 91. P. 611–627.

Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol. 92. P. 181–193.

Condie K.C. Chemical composition and evolution of upper crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. Vol. 92. P. 256–267.

Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review // J. Sed. Res. 1995. Vol. 65. P. 1–12.

Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sed. Geol. 1988. Vol. 55, No. 3/4. P. 319–322.

Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sed. Petrol. 1988. Vol. 58. P. 820–829.

Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea // Sedimentary Geology. 2002. Vol. 149. P. 219–235.

Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // Geol. Soc. Spec. Publs. L., 1982. Vol. 10. P. 551–561.

Middleton G.V. Chemical composition of sandstones // Geol. Soc. Amer. Bull. 1960. Vol. 71. P. 1011–1026.

Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature. 1982. Vol. 299. P. 715–717.

Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio // J. Geol. 1986. Vol. 94, N 5. P. 635–650.

## Characteristics of the Meta Sandstones of the Svetlinskaya Suite, a Substrate of Alkaline Ore Metasomatites (Oktyabrskoe Ore Field, Middle Timan)

O.V. Udoratina<sup>a,b</sup>, N.Yu. Nikulova<sup>a</sup>, I.A. Gubarev<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS

54 Pervomaiskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia. E-mail: udoratina@geo.komisc.ru

<sup>b</sup>Tomsk State University

36 Lenina Str., Tomsk 634050, Russia

<sup>c</sup>Kazan Federal University

Institute of Geology and Petroleum Technology

4/5 Kremlevskaya Str., Kazan 420008, Russia. E-mail: i.gubarev2014@yandex.ru

The paper considers the characteristics of the meta sandstones of the Svetlinskaya Suite developed within the Oktyabrskoe ore field at the Chetlas Stone (Middle Timan) and serving as a substrate for ore alkaline metasomatites. The main source of detrital material for fine-grained feldspar-quartz metasandstones during their formation were the meta-sedimentary and, to a lesser extent, acidic igneous rocks, including those altered in the weathering crust. The formation of metapsammites took place under relatively stable tectonic conditions of the passive continental margin.

Key words: *metasandstones; passive continental margin; Oktyabrskoe ore field; Middle Timan.*

### References

Brusnitsyna Ye.A., Yershova V.B., Khudoley A.K., Andresen T. 2019. Rezultaty issledovaniy U-

Pb vozrasta oblomochnykh tsirkonov iz srednepozdnerifeyskikh otlozheniy Chetlasskogo Kamnya (Timanskoy gryady) [Research results of U-Pb age of detrital zircons from the Middle-Late Riphean deposits of the Chetlas Stone (Timan ridge)]. In: Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment: Materials of the 28th scientific conference. Syktyvkar, Geoprint, pp. 7-11. (in Russian)

*Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* 1987. Sands and Sandstones. Springer-Verlag New York, p. 553. doi: 10.1007/978-1-4612-1066-5

*Rozen O.M., Zhuravlev D.Z., Lyapunov S.M.* 1994. Geokhimicheskiye issledovaniya osadochnykh otlozheniy Timano-Pecherskoy provintsii [Geochemical studies of sedimentary deposits of the Timan-Pecherskaya Province]. Razvedka i okhrana nedr. 1:18–21. (in Russian)

*Udoratina O.V., Burtsev I.N., Nikulova N.Yu., Khubanov V.B.* 2017. Vozrast metapeschanikov verkhnedokembriyskoy chetlasskoy serii Srednego Timana na osnovanii U-Pb datirovaniya detritnykh tsirkonov [Age of meta sandstones of the Upper Precambrian Chetlas series of Middle Timan based on U-Pb dating of detrital zircons]. Byull. Mosk. Ispytateley prirody. Ser. geol. 5:15–32. (in Russian)

*Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* 2000. Osnovy litokhimii (Fundamentals of lithochemistry). Nauka, SPb, p. 479. (in Russian)

*Bhatia, M.* 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. The Journal of Geology. 91:611–627. doi:10.1086/628815

*Bhatia M.R., Crook K.A.W.* 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contrib. Mineral. Petrol. 92:181–193.

*Condie K.C.* 1993. Chemical composition and evolution of upper crust: contrasting results from surface samples and shales. Chem. Geol. 92:256–267.

*Cox R., Lowe D.R.* 1995. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review. J. Sed. Res. 65:1–12.

*Harnois L.* 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. Sed. Geol. 55(3/4):319–322.

*Herron M.M.* 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log date. J. Sed. Petrol. 58:820–829.

*Lee Y.I.* 2002. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea. Sedimentary Geology. 149:219–235.

*Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-Sh.* 1982. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. Geol. Soc. Spec. Publ. L., 10:551–561.

*Middleton G.V.* 1960. Chemical composition of sandstones. Geol. Soc. Amer. Bull. 71:1011–1026.

*Nesbitt H.W., Young G.M.* 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature. 299:715–717.

*Roser B.P., Korsch R.J.* 1986. Determination of tectonic setting of sandstone mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. J. Geol. 94(5):635–650.