

УДК 551.71:552.31(471)

## АРХЕЙСКАЯ ТОНАЛИТ-ТРОНДЬЕМИТ-ГРАНОДИОРИТОВАЯ АССОЦИАЦИЯ КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ: ГЕОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ, ЭТАПЫ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

© 2022 г. В. П. Чекулаев<sup>1</sup>, \*, Н. А. Арестова<sup>1</sup>, Ю. С. Егорова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: vpchekulaev@mail.ru

Поступила в редакцию 08.12.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 12.02.2022 г.

На основе имеющихся геохронологических данных, в пределах Карельской провинции Фенноскандинавского щита выделены и охарактеризованы главные этапы образования архейских пород тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации с возрастными около 3240, 3150, 2900, 2850, 2800 и 2750 млн лет. Показаны особенности геологического положения и геохимического состава ТТГ-пород этих этапов. Так, ранние ТТГ-расплавы могли быть выплавлены не из базальтов архейских зеленокаменных поясов Карельской провинции, а из базитов нижней коры или ранних амфиболитов Водлозерского домена. Особенности геологического положения, химического состава и изотопной эволюции  $\epsilon_{Nd}(t)$  не подтверждают предположение о формировании большей части ТТГ из толеитов зеленокаменных поясов, таким образом исключая их генетическую связь с субдукцией древней океанической коры. Наиболее приемлемой представляется модель образования ТТГ в Карельской провинции в результате плавления мафитов нижней коры под воздействием плюма. Архейские ТТГ заметно отличаются от фанерозойских плагиигранитоидов не только формой и размерами массивов, но и рядом геохимических особенностей, в частности более низкими содержаниями HREE, Sc, Y и Ti.

**Ключевые слова:** Фенноскандинавский щит, Карельская провинция, архей, тоналит-трондьемит-гранодиоритовая ассоциация

**DOI:** 10.31857/S0869592X22040020

### ВВЕДЕНИЕ

Породы тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации являются главной составляющей коры древних кратонов. Именно поэтому исследователи постоянно возвращаются к проблеме образования этих пород. Для ТТГ-пород Фенноскандинавского щита имеется достаточно много данных, на базе которых были получены важные результаты (Чекулаев, 1996; Чекулаев и др., 2018; Чекулаев, Арестова, 2018; Лобач-Жученко и др., 1999, 2000; Ранний..., 2005; Вревский и др., 2010 и др.). Тем не менее представляется своевременной работа, в краткой форме обобщающая все имеющиеся на сегодняшний день данные по архейским ТТГ-породам Фенноскандинавского щита. Настоящая работа продолжает серию статей, обобщающих наши исследования архейских вулканитов (Арестова и др., 2015; Чекулаев и др., 2018), осадочных пород (Чекулаев, Арестова, 2020) и плагиионоклиновых гранитов (Чекулаев и др., 2020).

Исходя из того, что рассматриваемая ассоциация пород представлена преимущественно тона-

литами и трондьемитами, а гранодиориты имеют резко подчиненное значение, в дальнейшем иногда будет использована аббревиатура ТТ, т.е. тоналит-трондьемиты.

Восточная часть Фенноскандинавского щита представлена тремя крупными фрагментами архейской коры или провинциями (Ранний..., 2005): Кольско-Норвежской (гранулит-зеленокаменная область), Беломорской (Беломорский складчатый пояс) и Карельской (Карельская гранит-зеленокаменная область).

Геохронологические и изотопно-геохимические исследования последних десятилетий показали, что наиболее полно архейские ТТГ-породы представлены в Карельской провинции, где они формировались в интервале времени от 3240 до 2650 млн лет (Ранний..., 2005; Арестова и др., 2015; Чекулаев и др., 2018; Чекулаев, Арестова, 2018), т.е. от палеоархея почти до границы архея и палеопротерозоя. Поэтому Карельская провинция является наиболее информативной для изу-

чения истории этих пород на протяжении почти 600 млн лет.

Другой особенностью Карельской провинции является ее гетерогенность, обусловленная наличием в ее строении трех фрагментов (доменов или субпровинций), выделенных на основании различий в строении коры и во времени образования слагающих ее комплексов пород (Лобач-Жученко и др., 2000): Водлозерского, Западно-Карельского и Центрально-Карельского (рис. 1).

### ГЕОЛОГИЯ КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНАЛИТ-ТРОНДЬЕМИТ-ГРАНОДИОРИТОВ

Наиболее детально архейские образования изучены в пределах Водлозерского домена, который занимает юго-восточную часть Карельской провинции (рис. 1) (Куликов и др., 1990; Лобач-Жученко и др., 1999; Чекулаев и др., 2002; Ранний..., 2005; Арестова и др., 2012, 2015 и др.). Центральная часть домена сложена преимущественно породами ТТГ-ассоциации, образованными в течение нескольких временных этапов. В краевых частях располагаются зеленокаменные пояса, в разрезах которых преобладают метаморфизованные вулканиды коматиит-базальтовой серии и вулканиды средне-кислого состава, имеющие возраст соответственно около 3.0 и 2.9 млрд лет (Арестова и др., 2015; Чекулаев и др., 2018). От других доменов Водлозерский домен отличается тем, что в его пределах в значительном объеме присутствуют породы с возрастом более 3.1 млрд лет и модельным возрастом  $t_{Nd(DM)}$  в интервале 3.3–3.4 млрд лет.

В Водлозерском домене выделяются (Арестова и др., 2015) четыре этапа образования ТТГ-пород с возрастными около 3240, 3150, 2900 и 2850 млн лет (табл. 1). Наиболее древние (древнее 3.2 млрд лет) ТТГ-породы присутствуют только в центральной части домена (районы рек Водла, Выг, Лайручей, Черева и Винела). В пределах других доменов Карельской провинции древние породы с возрастом до 3.5 млрд лет описаны в северо-западной (финляндской) части провинции в районе Пудасъярви (Mutanen, Nuhma, 2003), где они представлены небольшим фрагментом.

Следующий этап ТТГ-плутонизма, имевший место около 3150 млн лет назад, представлен и изучен в районах среднего течения р. Выг на севере

и дер. Палая Ламба на западе Водлозерского домена, т.е. в его краевых частях вблизи обрамляющих зеленокаменных поясов. Породы с возрастом около 3.1 млрд лет описаны так же в Северной (район Койтелайнен) и Западной (район Иисалми) Финляндии (Paavola, 1986; Nuhma et al., 2012a).

Трондьемиты с возрастом около 2900 млн лет развиты в западной краевой части Водлозерского домена на границах Семченской и Палаламбинской зеленокаменных структур. В районе Палой Ламбы трондьемиты с возрастом  $2903 \pm 22$  млн лет образуют лейконому мигматитов по тоналитам с возрастом  $3141 \pm 10$  млн лет (Арестова и др., 2015). В районе слияния рек Суна и Семча на границе Семченской зеленокаменной структуры трондьемиты такого же возраста ( $2906 \pm 14$  млн лет) и состава слагают значительные площади, отделяя ТТГ-породы фундамента от метавулканитов структуры. Геологическое положение и состав трондьемитов этого этапа предполагает их образование в результате плавления тоналитов (Чекулаев, 1988; Арестова и др., 2015).

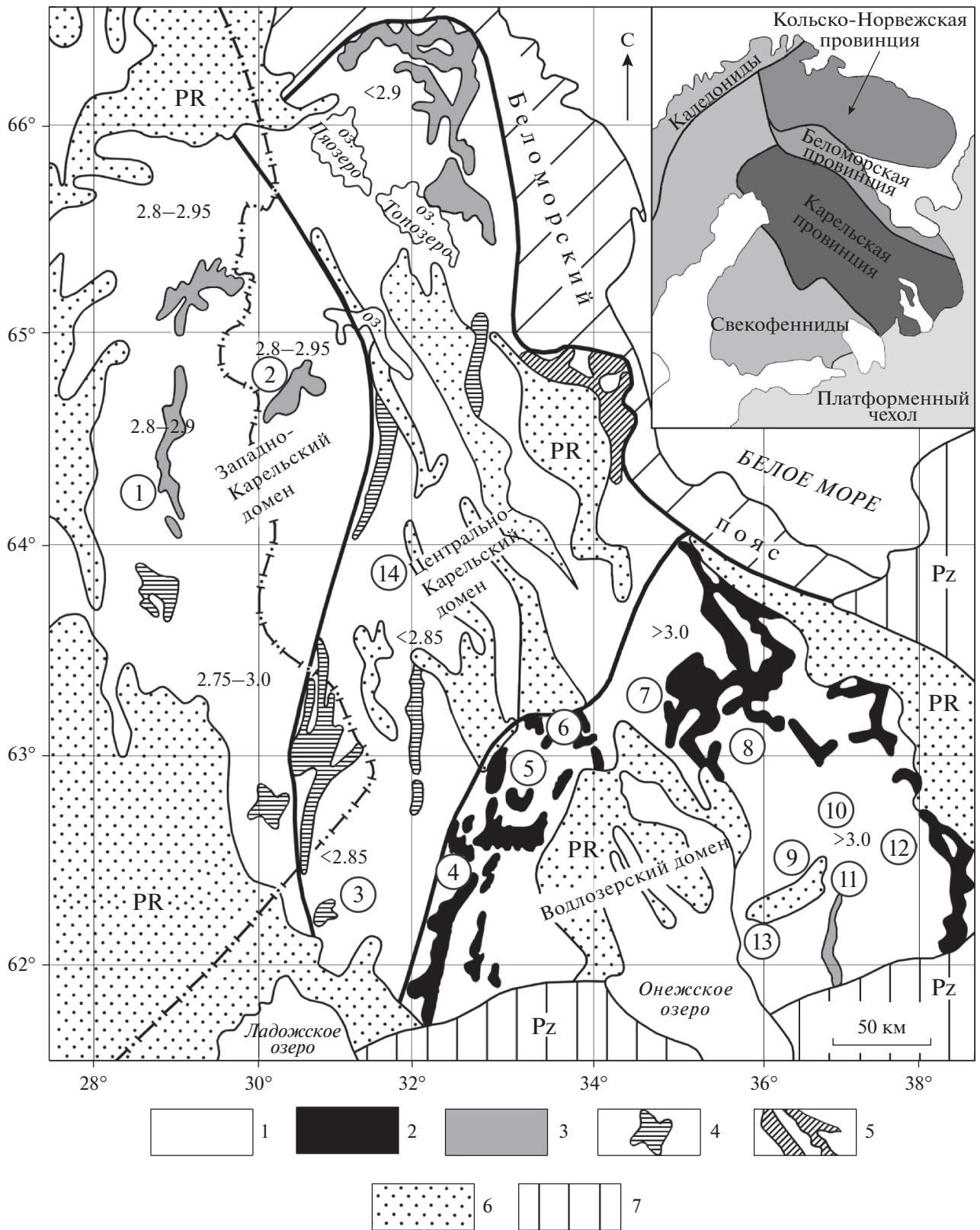
ТТГ-магматизм в Водлозерском домене завершился внедрением интрузий тоналитов с возрастом около 2850 млн лет, которые не имеют широкого распространения и представлены на севере Шилосским массивом и на восточном берегу Онежского озера массивом в районе пос. Шальский (Чекулаев и др., 2013). Тоналиты близки по составу к ТТГ-породам с возрастом около 3150 млн лет, но изотопный состав Nd указывает на их более молодой (менее 3 млрд лет) источник.

В строении Западно-Карельского домена преобладают породы, возраст которых не превышает 2850 млн лет (табл. 1). Домен занимает (рис. 1) центральную и восточную Финляндию и запад Карелии (район г. Костомукша). Возраст ТТ-пород и вулканитов зеленокаменных поясов Западно-Карельского домена в основном составляет около 2.8 млрд лет (Ранний..., 2005; Nuhma et al., 2012a), т.е. меньше возраста большинства мезоархейских пород Водлозерского домена. При этом модельный возраст  $t_{Nd(DM)}$  пород редко превышает 2.9–3.0 млрд лет (Nuhma et al., 2012b). Исключение составляют единичные более древние значения возраста вулканитов пояса Пудасъярви на северо-западе Финляндии (Nuhma et al., 2012a) и ТТГ-пород блока Иисалми в Западной Финляндии (Paavola, 1986).

Центрально-Карельский домен занимает западную часть Республики Карелия, а также район

**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Карельской провинции (по Кожевников, 2000, с упрощениями и дополнениями авторов).

1 – гранитоиды; 2–5 – зеленокаменные пояса с возрастом 2.9–3.0 млрд лет (2), 2.8–2.85 млрд лет (3), около 2.75 млрд лет (4), неопределенного возраста (5); 6 – протерозой; 7 – платформенный чехол. Районы проявления ТТГ-пород (цифры в кружках): 1 – зеленокаменные пояса Кухмо и Суомуссалми, 2 – г. Костомукша, 3 – оз. Суоярви, 4 – р. Суна, 5 – оз. Палая Ламба, 6 – оз. Остер, 7 – оз. Шилос, 8 – р. Выг, 9 – р. Лайручей, 10 – оз. Черное, 10 – р. Водла, 12 – пос. Шальский, 13 – р. Черева, 14 – оз. Ондозеро.



**Таблица 1.** Корреляция эндогенных процессов в разных доменах Карельской провинции

Возраст, млн лет	Западно-Карельский домен	Центрально-Карельский домен	Водлозерский домен
2600	Щелочные интрузии		Габбро
2650	Гранулитовый метаморфизм	Гранулитовый метаморфизм	Гранулитовый метаморфизм
2700	Граниты, санукитоиды	Граниты, санукитоиды	Граниты, санукитоиды
2750	Базиты, дайки, силлы, метаосадки	Интрузивные базиты, метаосадки, ТТ	Интрузивные базиты, метаосадки
2800	ТТ, кислые вулканиты, базиты зеленокаменных поясов		
2850			ТТ-интрузивы, габбро
2900	Обломочный циркон		ТТ-плутонизм, кислые вулканиты
2950		$t_{Nd(DM)}$	Габбро
3000		Обломочный циркон	Базиты зеленокаменных поясов
3050			
3100			
3150	ТТ (протолит)		ТТ-породы
3200			
3250	$t_{Nd(DM)}$		ТТ-породы, базиты
3300			Обломочный циркон
3350			
3400			$t_{Nd(DM)}$
3450			
3500			

Примечание. Обломочный циркон для Водлозерского домена отобран из кварцита Маткалахинской структуры (Кожевников, Скублов, 2010), для Центрально-Карельского и Западно-Карельского доменов – из граувакк пояса Хатту и района Луома (Финляндия) соответственно (Nuhma et al., 2012a). Значения  $t_{Nd(DM)}$  для Водлозерского домена определены по тоналитам Лайручья и р. Выг, для Центрально-Карельского домена – по тоналитам района Суоярви (оригинальные данные), для Западно-Карельского домена – по гранитоидам района Суомуссалми (Nuhma et al., 2012b).

Иломанси в Восточной Финляндии (рис. 1) (Лобач-Жученко и др., 2000; Ранний..., 2005). Границы домена с соседними Водлозерским и Западно-Карельским доменами маркируются неоархейскими зеленокаменными структурами, а также приуроченными к этим границам субщелочными санукитоидными интрузиями (Чекулаев и др., 2005). На севере граница домена с мезоархейскими образованиями Северо-Карельской гранит-зеленокаменной системы (Слабунов, 1993; Чекулаев и др., 2005) остается неясной. Домен сложен гранитоидами и супракрystalльными породами, возраст которых не превышает 2.78 млрд лет (Чекулаев и др., 2005; Nuhma et al., 2012a), а значения  $t_{Nd(DM)}$  составляют 2.85–2.9 млрд лет (Nuhma et al., 2012b), при этом вулканиты и ТТГ-породы имеют близкий возраст около 2.74–2.75 млрд лет, вероятно образуя вулканоплутоническую ассоциацию (Чекулаев и др., 2005, 2018).

#### СОСТАВ ТТГ-ПОРОД И ЕГО ЭВОЛЮЦИЯ В ХОДЕ ФОРМИРОВАНИЯ АРХЕЙСКОЙ КОРЫ КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Для более обоснованного сравнительного анализа химического состава ТТГ-пород мы ограничились рассмотрением пород с содержанием  $SiO_2$  в интервале от 63 до 72 мас. % и  $K_2O$  не более 3 мас. %. В основном все ТТГ-породы Карельской провинции характеризуются близкими средними содержаниями главных элементов (табл. 2). Это согласуется с предположением о сходстве средних составов архейских ТТГ-пород в целом всех древних кратонов и крупных фрагментов коры масштаба провинций (Чекулаев, 2009; Чекулаев, Глебовицкий, 2017), что демонстрирует спайдер-диаграмма на рис. 2. В то же время отмечались различия химического состава ТТГ-пород в пределах более мелких фраг-

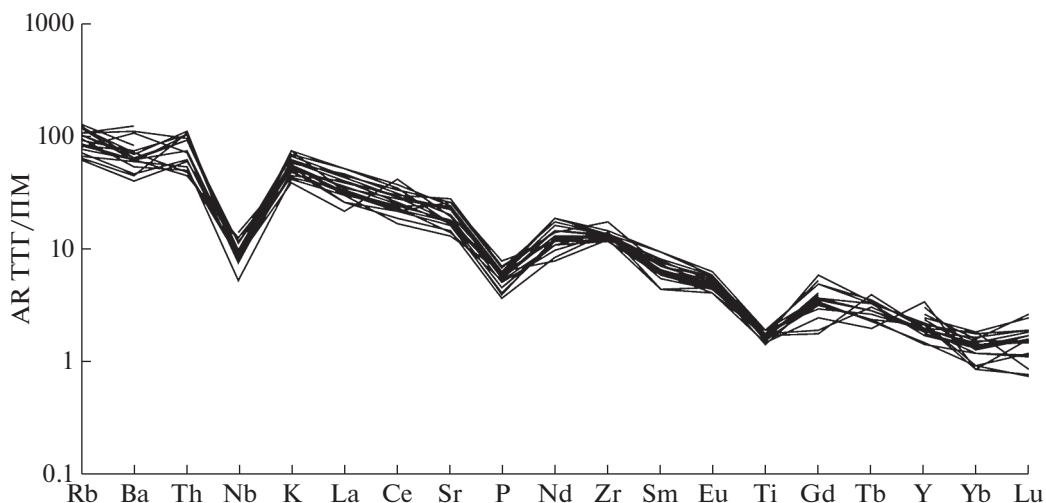
Таблица 2. Средние составы пород ТТ-ассоциации разных этапов

Домен	Водлозерский												Западно-Карельский		Центрально-Карельский	
	~3240			~3150			~2900			~2850			~2800		~2750	
	Средний	Ст. откл.		Средний	Ст. откл.		Средний	Ст. откл.		Средний	Ст. откл.		Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.
SiO <sub>2</sub>	67.48	2.40	67.02	2.85	68.70	1.87	67.87	2.34	69.23	2.75	68.87	2.65				
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.18	0.40	0.08	0.36	0.10	0.41	0.17	0.41	0.19	0.34	0.14				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.38	1.07	16.04	1.24	15.93	0.85	15.93	1.18	15.46	0.77	16.25	1.18				
FeO <sub>tot</sub>	3.19	0.91	3.67	0.82	2.76	0.58	3.70	0.89	3.32	1.48	2.82	1.05				
MnO	0.05	0.02	0.09	0.10	0.05	0.02	0.06	0.02	0.09	0.04	0.05	0.04				
MgO	1.33	0.54	1.49	0.52	1.16	0.29	1.56	0.47	1.28	0.68	0.94	0.57				
CaO	3.88	0.87	3.72	1.32	2.83	0.59	3.62	0.93	3.37	0.92	3.08	0.61				
Na <sub>2</sub> O	4.63	0.65	4.11	0.75	4.54	0.49	4.30	0.51	4.36	0.71	4.73	0.77				
K <sub>2</sub> O	1.14	0.55	2.11	0.55	1.92	0.50	1.30	0.43	1.54	0.55	1.72	0.68				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.07	0.11	0.03	0.12	0.06	0.13	0.05	0.14	0.074	0.13	0.07				
Плпп	1.09	0.52	1.22	0.46	0.94	0.52	0.85	0.29	0.57	0.25	0.77	0.34				
mg#	0.42		0.42		0.43		0.43		0.40		0.35					
Rb	40	27	80	30	71	19	42	17	62	30	55	29				
Sr	405	80	263	64	410	141	319	78	279	147	571	143				
Ba	450	304	470	160	516	221	310	110	371	212	705	472				
Y	7.5	3.9	10.9	3.5	8.8	3.8	10.9	5.3	15.2	10	8.5	4.2				
Zr	152	67	109	35	161	78	150	68	165	51	151	77				
Hf	3.22	1.30	3.40	1.20	4.47	0.22	4.94	2.72	6.68	4.94						
Nb	5.3	3.1	7.5	2.0	6.3	2.2	5.0	3.2	8.3	5	6.2	3.6				
Ta	0.89	0.40	0.7	0.2	1.79	2.82	0.54	0.39	2.29	3						
Pb	12.4	2.7	15.4	4.7	13.5	5.7	9.0	4.04	20.0	37	17.8	5.0				
Th	3.9	3.3	10.8	7.3	8.9	9.0	3.01	2.47	7.8	5	8.9	6.3				
U	0.66	0.32	3.97	2.90	1.45	1.56	1.09	1.40	2.07	2	0.52	0.42				
La	18.6	13.8	25.7	10.4	26.2	25.6	21.2	21.7	29.4	14.5	30.5	22.0				
Ce	35.8	22.9	47.8	18.6	49.5	47.4	42.2	42.2	54.5	26.2	56.1	37.2				
Pr	4.97	3.2	4.5	1.3	5.79	6.12	3.41	1.71	6.17	2.70	2.25	1.14				

Таблица 2. Окончание

Домен	Водлозерский						Западно-Карельский		Центрально-Карельский			
	~3240		~3150		~2900		~2850		~2800		~2750	
Возраст, млн лет	Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.	Средний	Ст. откл.
Nd	13.6	7.1	15.8	4.7	17.45	15.50	16.5	13.67	21.3	9.4	23.9	15.3
Sm	2.42	1.02	2.76	0.80	3.11	2.42	3.41	2.35	3.60	1.63	3.81	2.12
Eu	0.76	0.15	0.74	0.12	0.70	0.17	0.83	0.31	0.91	0.34	0.87	0.46
Gd	1.51	0.61	2.45	0.37	3.06	2.37	2.88	1.72	3.13	1.69	1.33	0.89
Tb	0.26	0.15	0.37	0.07	0.29	0.18	0.46	0.28	0.45	0.27	0.38	0.19
Dy	0.90	0.66	2.11	0.35	2.09	0.72	1.79	1.24	2.43	1.66	0.86	0.69
Ho	0.16	0.14	0.42	0.07	0.39	0.16	0.31	0.18	0.49	0.35	0.15	0.12
Er	0.46	0.36	1.40	0.39	1.04	0.48	0.87	0.66	1.32	0.98	0.43	0.34
Tm	0.06	0.06	0.19	0.04	0.14	0.06	0.12	0.09	0.20	0.15	0.06	0.05
Yb	0.57	0.58	1.19	0.36	0.88	0.59	0.87	0.54	1.27	0.99	0.37	0.17
Lu		0.08	0.21	0.06	0.17	0.12	0.11	0.06	0.19	0.14	0.07	0.05
Сумма РЗЭ	80.2		105.8		110.8		94.9		125.4		121.1	
Sr/Y	66.4		21.6		54.2		36.6		35.1		81.7	
(La/Yb) <sub>n</sub>	32.3		17.4		21.0		16.3		28.47		58.9	
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	4.04		1.62		2.09		3.24		2.66		2.95	
(La/Sm) <sub>n</sub>	5.24		6.12		4.51		4.26		5.62		5.14	
Eu/Eu*	1.22		0.90		0.92		0.90		0.88		0.95	
K/Na	0.26		0.53		0.44		0.31		0.37		0.38	
(Nb/La) <sub>n</sub>	0.32		0.31		0.35		0.43		0.26		0.27	
Zr/Y	24.4		9.7		20.7		15.2		16.85		21.3	
n (глав/ред)	113/114		37/26		28/28		46/40		129/92		72/64	

Примечание. Оксиды приведены в мас. %, редкие и редкоземельные элементы в мкг/г, n - число анализов. Для расчета средних составов по Водлозерскому и большей части Центрально-Карельского (кроме района Иломанси в Финляндии) доменов использованы оригинальные данные; по Западно-Карельскому – оригинальные данные по районам Костомукши, оз. Тулос, дер. Вокнаволок, а в основном данные разных авторов по финляндской части Карельской провинции.



**Рис. 2.** Мультиэлементная диаграмма (спайдерграмма) для нормированных на примитивную мантию (по Sun, McDonough, 1989) средних составов ТТГ архейских кратонов и крупных фрагментов коры. Для расчета использованы более 1600 анализов ТТГ-пород всех докембрийских щитов и крупных фрагментов щитов (Чекулаев, 2009).

ментов, в нашем случае доменов (Чекулаев, Глебовицкий, 2017).

Тоналит-трондъемиты с возрастом около 3240 млн лет характеризуются (табл. 2, 3) низкими содержаниями К, Rb, Y, Th, низким отношением Rb/Sr, более высоким содержанием Sr и более высокими отношениями Sr/Y,  $(La/Yb)_n$ ,  $(Gd/Yb)_n$ ,  $(La/Sm)_n$ , Zr/Y, в целом отличаясь от ТТГ-пород других этапов. Такие особенности состава, в частности высокое отношение  $(Gd/Yb)_n$ , указывают на довольно глубинные условия формирования расплавов с образованием граната в рестите. Это согласуется с высоким содержанием в них Sr и положительной аномалией Eu ( $Eu/Eu^* = 1.22$ ).

Тоналиты с возрастом около 3150 млн лет отличаются от более ранних повышенными содержаниями  $K_2O$ , Rb, Y, REE,  $\Sigma REE$  и более низкими отношениями Sr/Y и  $(La/Yb)_n$  (табл. 2, рис. 3), что может отражать как иной состав источника, так и менее глубинные условия образования расплавов (Арестова и др., 2015; Чекулаев, Глебовицкий, 2017; Чекулаев и др., 2018).

Состав трондъемитов с возрастом около 2900 млн лет близок к составу тоналитов основания с возрастом около 3150 млн лет (табл. 2, 3), отличаясь более высоким содержанием Sr, меньшими содержаниями Y и Zr и, соответственно, высоким отношением Sr/Y (рис. 3). Такой состав трондъемитов в сочетании с геологическими наблюдениями предполагает их образование в результате плавления тоналитов (Чекулаев, 1988; Арестова и др., 2015), что подтверждается присутствием в них древнего ксеногенного циркона, соответствующего по морфологии и составу таковому в более древних тоналитах (Арестова и др., 2017), а также изотопным

составом Nd, согласно которому источник трондъемитов имеет возраст 3130–3150 млн лет.

Тоналиты с возрастом около 2850 млн лет, имеющие ограниченное распространение, по содержаниям  $K_2O$ , Rb, Zr, LREE и отношению  $(Gd/Yb)_n$  также приближаются к ранним ТТГ-породам с возрастом 3240 млн лет (рис. 4, табл. 2, 3), а по содержанию Sr, отношениям  $(La/Yb)_n$ ,  $Eu/Eu^*$ , Zr/Y – к ТТГ-породам с возрастом 3150 млн лет, но изотопный состав Nd указывает на их более молодой (<3 млрд лет) источник.

Породы ТТГ-ассоциации Западно-Карельского домена с возрастом около 2.8–2.85 млрд лет, изученные в обрамлении зеленокаменных поясов Финляндии и в Западной Карелии, сходны с ТТГ с возрастом около 2850 млн лет по содержанию главных и литофильных (Sr, Ba, Rb) элементов (табл. 2, 3), но отличаются меньшей магнезиальностью и обогащением высокозарядными (HFS) элементами, такими как Y, Nb, Zr, P, а также REE, что видно при сравнении средних составов (табл. 2), о чем мы писали и раньше (Чекулаев, Глебовицкий, 2017), но не всегда выявляется на диаграммах, построенных на основе нормированных значений.

Наиболее поздние неоархейские ТТГ-породы, развитые почти исключительно в пределах Центрально-Карельского домена, заметно отличаются от пород предыдущих этапов по составу, что хорошо видно в табл. 2, 3 и на рис. 5 (см. также рис. 5 в Чекулаев и др., 2018). По сравнению с мезоархейскими ТТГ Западно-Карельского и особенно Водлозерского домена, для которых имеется много аналитических данных (рис. 5), неоархейские ТТГ характеризуются более высокими содержаниями литофильных элементов К, Rb, Sr, Ba, LREE, а

Таблица 3. Представительные анализы пород тоналит-трондьемитовой ассоциации Карелии

Возраст, млрд лет	3.24								3.15	
	р. Водла		оз. Черное		Лайручей		р. Черева		р. Выг	
№ пробы	45	45д	25-85	1146	1161-05	301	304	42/3	пр. 85	3010/5
Источник	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SiO <sub>2</sub>	63.65	68.24	66.42	66.45	68.4	69.86	65.07	68.01	69.6	69.2
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.38	0.47	0.48	0.31	0.41	0.28	0.36	0.37	0.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.18	16.13	16.12	16.21	16.6	14.7	16.45	15.6	15.5	15.1
FeO <sub>tot</sub>	5.25	2.94	3.77	3.71	3.04	3.54	4.33	3.12	3.42	3.16
MnO	0.13	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.05	0.06	0.07	0.07
MgO	3.22	1.62	1.93	1.14	0.85	1.87	1.33	1.34	0.85	1.36
CaO	5.78	4.42	4.36	4.57	3.42	2.87	3.91	3.24	3.54	3.2
Na <sub>2</sub> O	4.09	4.33	4.14	4.94	5.3	4.01	4.66	4.13	3.55	3.45
K <sub>2</sub> O	1.08	1.9	1.58	1.06	0.98	1.3	1.37	2.32	3.65	2.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14		0.08	0.1	0.09	0.03	0.1	0.09	0.11	0.09
mg#	0.52	0.50	0.48	0.35	0.33	0.49	0.35	0.43	0.31	0.43
Rb	35	28	76	32	19.1	72	28.6		80	83.1
Sr	431	475	330	432	380	318	364		230	193
Ba	514	458	354	226	336	397	570	446	668	400
Y	14	11	21	8	4.5	2.52	3.35	9.24	12	11.2
Zr	113	240	105	150	155	76.3	210		81	97.1
Hf	1.08	4.59	3.5		3.65			3.01		
Nb	6.0	7.0	6.0	6.0	2.5	2.0	4.9	6.9	7.0	7.0
Ta	3.41	0.26	3.3		<1	0.11	0.17	0.67		
Pb	11	10	12	13	6.41				32	14.6
Th	0.95	2.3	2		3.45	0.63	15.7	9.74	20	18.3
U					0.15	0.28	0.3			3.7
La	15.5	17.1	19.0	16.0	22.0	7.1	57.6	24.1	27.0	27.8
Ce	34.0	38.6	42.0	35.0	40.3	12.5	97.5	41.4	51.0	47.5
Pr			17.09		4.1	1.19	9.41	4.18	4.58	4.78
Nd	16.1	14.19	23	12	13.3	4.71	29.9	14.3	16	16.2
Sm	3.29	2.25	3.82	2.80	1.95	0.83	3.83	2.13	3.70	3.06
Eu	0.94	0.84	0.84	0.90	0.71	0.71	0.78	0.71	1.00	0.72
Gd				1.50	1.58	0.66	2.21	2.11	2.60	2.26
Tb	0.40	0.28	0.57		0.22	0.11	0.24	0.29		0.35
Dy					0.93	0.48	0.92	1.61		1.89
Ho					0.15	0.10	0.14	0.32		0.36
Er				0.50	0.41	0.21	0.33	1.00	2.30	1.28
Tm					0.06	0.04	0.04	0.14		0.17
Yb	0.89	0.52	2.20	0.40	0.38	0.29	0.25	0.91	1.20	1.05
Lu			0.27		0.06	0.05	0.04	0.16		
Rb/Sr	0.08	0.06	0.23	0.07	0.05	0.23	0.08		0.35	0.43
Sr/Y	30.8	43.2	15.7	54.0	84.4	126.2	108.7		19.2	17.2
(La/Yb) <sub>n</sub>	12.5	23.6	6.2	34.1	41.5	17.7	165.3	19.0	16.1	19.0
(Gd/Yb) <sub>n</sub>				3.10	3.44	1.88	7.31	1.92	1.79	1.78
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	2.04	2.45	1.18		2.63	1.72	4.36	1.45		1.52
(La/Sm) <sub>n</sub>	3.04	4.91	3.21	3.69	7.28	5.55	9.71	7.30	4.71	5.86
Sm/Nd	0.20	0.16	0.17	0.23	0.15	0.18	0.13	0.15	0.23	0.19
Eu/Eu*	0.91	1.18	0.67	1.27	1.17	2.66	0.71	1.03	1.07	0.75
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.27	0.44	0.38	0.21	0.18	0.32	0.29	0.56	1.03	0.73
(Nb/La) <sub>n</sub>	0.37	0.39	0.30	0.36	0.11	0.27	0.08	0.27	0.25	0.24
Zr/Y	8.1	21.8	5.0	18.8	34.4	30.3	62.7	0.0	6.8	8.7



Таблица 3. Продолжение

Возраст, млрд лет	3.15		2.903		2.906		2.90	2.85		
Район	Палая Ламба				р. Суна		оз. Остер	Шальский		оз. Шилюс
№ пробы	132	39	39а	56	2006и	V-101	79а	802/1	802/2	1888
Источник	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
SiO <sub>2</sub>	67	64.1	71	70.2	66.3	66.4	73	58.6	63.7	66.8
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.5	0.23	0.27	0.32	0.46	0.16	0.91	0.41	0.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	16.7	15	15.5	17.78	16.65	13.9	17.4	18.7	15.73
FeO <sub>tot</sub>	3.62	4.22	2.38	2.24	2.67	3.71	2.06	6.3	3.12	5.54
MnO	0.06	0.07	0.036	0.035	0.07	0.04	0.018	0.13	0.036	0.08
MgO	1.53	2.11	0.86	1	1.13	1.47	0.62	3.18	1.57	2.46
CaO	4.49	3.16	2.33	3	3.15	3.64	3.85	6.19	3.61	3.08
Na <sub>2</sub> O	4.34	4.49	4.79	5	4.76	4.65	4.75	4.2	5.81	4.26
K <sub>2</sub> O	1.34	2.78	1.93	1.36	1.88	1.64	0.48	0.87	1.85	1.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.17	0.08	0.1	0.13	0.21	0.062	0.18	0.21	
mg#	0.43	0.47	0.39	0.44	0.43	0.41	0.35	0.47	0.47	0.44
Rb	85	186	82	73	76	46.8	18	26.7	77	46
Sr	264	271	238	268	521	413	230	273	331	192
Ba	267	559	486	187	734	674	97	292	540	328
Y	13.5	16.9	10.7	11.5	8	8.06	18	23	6.7	26
Zr	208	208	192	177	95	216	230	288	87	165
Hf	5.07	4.88	4.32	4.37		4.73	2.14	7.4	2.28	
Nb	7.1	9.5		9.1	6.0	4.8	2.0	7.2	8.3	7.0
Ta	0.57	0.91	1.3	0.8			0.26	0.86	0.32	
Pb	7.16	10	10.3	13.4				7.2	4.2	8
Th	7.38	2.65	3.9	7.35	6	0.94	3.38	2.7	0.98	3
U	1.07	1.13	1.4	1.42			0.74	1.16	0.66	
La	26.2	13.9	8.1	25.5	6.8	17.4	5.2	12.8	14.9	18.7
Ce	56.3	27.4	20.3	44.4	12.0	35.0	7.8	30.2	29.4	38.2
Pr	5.21	2.9	1.7	4.95		3.63	0.86	4.55	3.51	
Nd	18.3	11.1	7.06	16.5	3.8	15.4	3.11	21.2	13.1	14.9
Sm	3.30	2.63	2.21	2.63	1.40	2.76	0.50	6.37	2.71	3.76
Eu	0.77	0.68	0.65	0.54	0.53	0.92	0.27	0.95	0.70	1.11
Gd	2.83	2.77	1.86	2.60		2.27	0.43	5.67	2.57	4.65
Tb	0.40	0.44	0.28	0.36	0.17	0.28	0.05	0.84	0.35	0.90
Dy	2.35	2.72	1.57	2.05		1.62	0.36	4.21	1.44	
Ho	0.47	0.54	0.35	0.39		0.30	0.07	0.68	0.27	
Er	1.32	1.66	0.91	1.06		0.74	0.19	2.21	0.52	
Tm	0.19	0.23	0.12	0.14	0.12	0.10	0.02	0.29	0.06	
Yb	1.33	1.91	0.93	1.09	0.40	0.61	0.26	1.77	0.33	1.72
Lu	0.22	0.28	0.16	0.14	0.04	0.11	0.05	0.23	0.05	
Rb/Sr	0.32	0.69	0.34	0.27	0.15	0.11	0.08	0.10	0.23	0.24
Sr/Y	19.6	16.0	22.2	23.3	65.1	51.2	12.8	11.9	49.4	7.4
(La/Yb) <sub>n</sub>	14.1	5.2	6.2	16.8	12.2	20.5	14.2	5.2	32.4	7.8
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1.76	1.20	1.65	1.97		3.08	1.37	2.65	6.44	2.24
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1.37	1.05	1.37	1.50	1.93	2.09	0.94	2.16	4.82	2.38
(La/Sm) <sub>n</sub>	5.13	3.41	2.36	6.26	3.14	4.07	6.66	1.30	3.55	3.21
Sm/Nd	0.18	0.24	0.31	0.16	0.37	0.18	0.16	0.30	0.21	0.25
Eu/Eu*	0.74	0.76	0.92	0.63	1.20	1.09	1.74	0.46	0.81	0.78
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.31	0.62	0.40	0.27	0.39	0.35	0.10	0.21	0.32	0.30
(Nb/La) <sub>n</sub>	0.26	0.66		0.35	0.85	0.27	0.37	0.54	0.54	0.36
Zr/Y	15.4	12.3	17.9	15.4	11.9	26.8	12.8	12.5	13.0	6.3

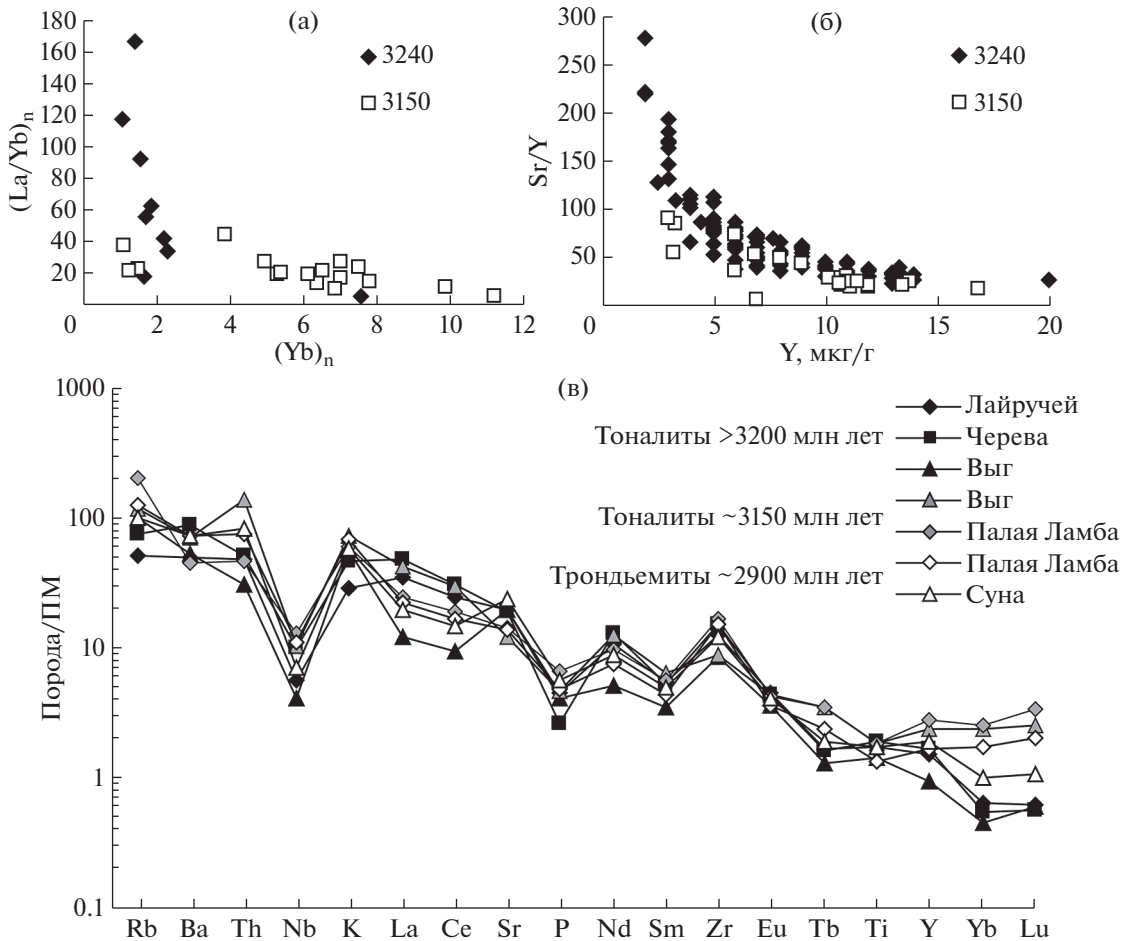
Таблица 3. Продолжение

Возраст, млрд лет	2.85	2.8		2.8-2.84						
Район	оз. Шилос	Костомукша		Кухмо		Костомукша				
№ пробы	111400	132	173о	3ТТТ 96 1	167ТОН 93	К-23-1/01	К-54/01	30.01.	К-5-1/01	32-1/00
Источник	2	1	1	3	3	4	4	4	4	4
SiO <sub>2</sub>	66	68.5	70.71	68.5	66.1	71.77	69.28	64.92	70.51	68.16
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.52	0.29	0.504	0.656	0.29	0.42	0.71	0.25	0.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.29	15.36	15.12	15.6	15.8	15.86	16.36	15.06	16.71	16.62
FeO <sub>tot</sub>	3.88	3.09	2.75	4.07	4.68	2.484	3.249	6.444	1.602	2.943
MnO	0.06	0.1	0.1	0.08	0.08	0.12	0.13	0.16	0.12	0.12
MgO	1.93	1.22	0.72	1.44	2.01	0.67	1.05	2.55	0.63	1.42
CaO	4.71	4.22	3.55	2.59	2.78	3.33	3.68	3.51	3.05	3.36
Na <sub>2</sub> O	4.4	4.8	4.84	4.9	4.83	3.7	4.01	3.03	4.89	4.31
K <sub>2</sub> O	0.88	1.45	1.27	1.52	2.12	1.39	1.34	2.62	1.97	2.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.07	0.07	0.138	0.186	0.1	0.13	0.27	0.09	0.13
mg#	0.47	0.41	0.32	0.39	0.43	0.32	0.37	0.41	0.41	0.46
Rb	19	39	57	47	32	60	69	139	49	69
Sr	305	573	344	195	162	341	317	190	653	610
Ba	202	281	153	376	367	338	187	371	607	890
Y	5	15	10	19.5	26	7.29	18.2	32.5	4.02	5.03
Zr	120	130	157	125	82	163	253	252	108	218
Hf	3.24	2	2.8							
Nb	3.0	5.0	6.0	6.0	12.5	9.2	7.0	14.9	1.7	7.4
Ta	0.2	0.15	0.62	0.6						
Pb		10	14							
Th	0.9	5	5	5.2	5.8	12.3	17.3	7.48	1.72	6.65
U	0.5		3.7	1.7	1.1	1.63	1.31	0.88	0.6	0.43
La	8.5	15.7	19.5	17.5	24.0	25.2	54.6	32.8	8.2	23.5
Ce	14.8	30.6	33.1	36.0	52.0	44.7	98.8	70.7	16.8	44.8
Pr	1.68			4.4	6.6	4.56	10.14	8.36	1.86	5.03
Nd	6.35	18.1	14.3	17	24.5	15.2	33.4	29.8	7.09	17.56
Sm	1.30	3.33	2.10	3.60	5.20	2.32	5.12	5.94	1.37	2.68
Eu	0.53	0.66	0.48	0.90	1.60	0.59	0.77	1.22	0.45	1.13
Gd	1.16			4.00	6.20	1.78	4.40	5.51	1.12	1.49
Tb	0.17	0.36	0.43	0.60	0.90	0.25	0.65	0.82	0.15	0.18
Dy	0.94			3.80	4.90	1.24	3.39	4.52	0.70	0.77
Ho	0.19			0.80	0.90	0.25	0.67	1.03	0.14	0.15
Er	0.53			2.10	2.70	0.61	1.68	2.74	0.36	0.30
Tm	0.08			0.30	0.40	0.09	0.23	0.41	0.05	0.05
Yb	0.49	0.87	0.73	2.10	2.40	0.57	1.34	2.85	0.33	0.26
Lu	0.09	0.13	0.11	0.30	0.30	0.09	0.19	0.38	0.05	0.05
Rb/Sr	0.06	0.07	0.17	0.24	0.20	0.18	0.22	0.73	0.08	0.11
Sr/Y	61.0	38.2	34.4	10.0	6.2	46.8	17.4	5.8	162.4	121.3
(La/Yb) <sub>n</sub>	12.5	12.9	19.2	6.0	7.2	31.7	29.2	8.3	17.9	64.8
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1.96			1.58	2.14	2.51	2.66	1.56	2.72	4.58
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1.58	1.88	2.68	1.30	1.70	1.99	2.20	1.31	2.07	3.15
(La/Sm) <sub>n</sub>	4.24	3.04	5.99	3.14	2.98	7.01	6.88	3.56	3.88	5.66
Sm/Nd	0.20	0.18	0.15	0.21	0.21	0.15	0.15	0.20	0.19	0.15
Eu/Eu*	1.27	0.64	0.64	0.74	0.90	0.85	0.48	0.64	1.08	1.57
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.20	0.30	0.26	0.31	0.44	0.38	0.33	0.86	0.40	0.48
(Nb/La) <sub>n</sub>	0.34	0.31	0.30	0.33	0.50	0.35	0.12	0.44	0.20	0.30
Zr/Y	24.0	8.7	15.7	6.4	3.2	22.4	13.9	7.8	26.9	43.3

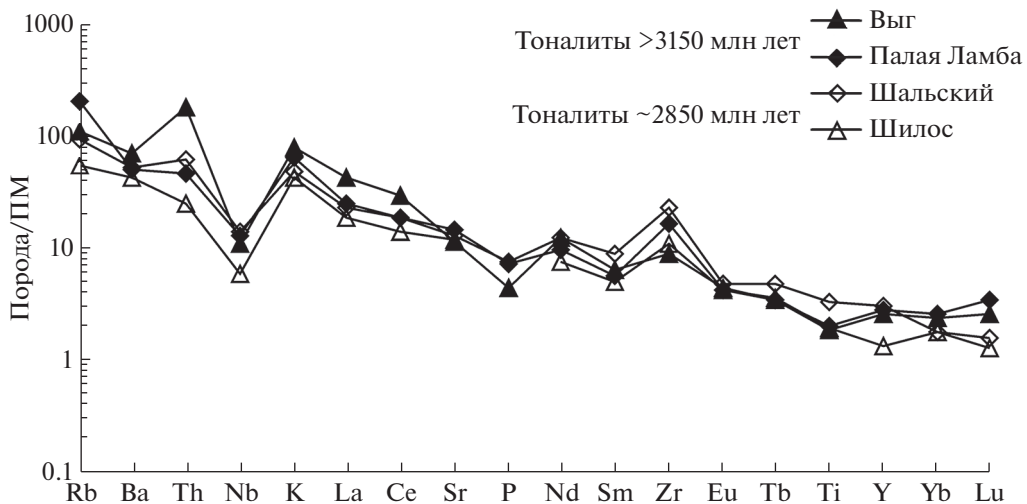
Таблица 3. Окончание

Возраст, млрд лет	2.766	2.7?		2.65			3.1		>3.317	~3.1
Район	Шальский	Суоярви		Кухмо	Суомуссалми		Койтелайнен		Пудасьярви	
№ пробы	802	123	142	4497	4501	4500	F-21	F-22	A1602	A1603
Источник	1	1	1	3	3	3	5	5	6	6
SiO <sub>2</sub>	68.2	69.29	68.8	68.03	71.95	70.45	68.15	68.5	70.3	73.3
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.15	0.19	0.51	0.29	0.37	0.46	0.46	0.45	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.1	17.14	17.42	15.58	14.93	14.6	15.61	15.5	15.6	14.8
FeO <sub>tot</sub>	2.2	1.8	1.71	2.71	1.49	2.221	3.19	3.12	2.097	1.152
MnO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02
MgO	0.94	0.87	1.07	1.03	0.91	1.47	0.95	0.83	0.92	0.44
CaO	3.57	2.75	2.39	3.2	2.28	2.23	4.04	3.7	3.17	2.61
Na <sub>2</sub> O	5.66	6.44	5.96	4.83	4.46	4.85	4.57	4.74	4.48	4.17
K <sub>2</sub> O	1.22	1.06	1.81	2.06	2.05	1.81	1.84	1.77	1.83	2.79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.06	0.07	0.18	0.09	0.1	0.12	0.11	0.03	0.04
mg#	0.43	0.46	0.53	0.40	0.52	0.54	0.35	0.32	0.44	0.41
Rb	34	19.4	47.4	75	67	92			57	59
Sr	314	766	568	716	290	255			311	449
Ba	391	338	361		591	408			503	970
Y	3.6	2.23	1.97	7	4	7			7.5	1.5
Zr	207	72.4	110	151	159	136			294	66
Hf	5.57								6.9	1.7
Nb	2.5	0.8	2.1						5.2	0.7
Ta	0.07	<0.01	<0.01						<0.2	<0.2
Pb	4.66								32	<30
Th	0.58	0.14	1.93						46	<0.5
U	1.11	<0.1	0.26						2	<0.2
La	10.2	3.7	16.4	32.0	20.3	21.5	9.0	9.4	123.0	11.4
Ce	18.0	7.7	27.5	61.9	36.1	39.4	16.7	18.8	213.0	17.2
Pr	1.99	0.95	3.08						22.2	1.7
Nd	6.91	4.1	10.4	25.75	11.56	13.69	6.23	7.04	75.8	5.83
Sm	1.20	0.91	1.50	3.97	1.46	1.80	1.40	1.41	10.00	0.69
Eu	0.61	0.34	0.45	0.97	0.31	0.48	0.58	0.58	1.35	0.35
Gd	1.19	0.73	0.91				1.26	1.27	6.77	0.66
Tb	0.17	0.10	0.13						0.59	<0.1
Dy	0.75	0.47	0.46	1.16	0.38	0.73	1.02	1.09	1.90	0.29
Ho	0.14	0.07	0.06						0.27	<0.1
Er	0.24	0.21	0.14	0.46	0.17	0.37	0.49	0.61	0.60	<0.15
Tm	0.04	0.03	0.02						<0.1	<0.1
Yb	0.26	0.16	0.10	0.37	0.13	0.38	0.42	0.61	0.55	0.12
Lu	0.03	0.03	0.02	0.06	0.03	0.06	0.07	0.10	<0.1	<0.1
Rb/Sr	0.11	0.03	0.08	0.10	0.23	0.36			0.18	0.13
Sr/Y	87.2	343.5	288.3	102.3	72.5	36.4			41.5	299.3
(La/Yb) <sub>n</sub>	28.1	16.5	122.5	62.1	112.0	40.6	15.3	11.1	160.4	68.1
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	3.79	3.77	7.84				2.48	1.72	10.18	4.55
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	2.97	2.76	6.16						4.88	
(La/Sm) <sub>n</sub>	5.49	2.60	7.06	5.21	8.98	7.71	4.14	4.32	7.94	10.67
Sm/Nd	0.17	0.22	0.14	0.15	0.13	0.13	0.22	0.20	0.13	0.12
Eu/Eu*	1.56	1.21	1.01	0.96	0.84	1.06	1.64	1.63	0.47	1.56
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.22	0.16	0.30	0.43	0.46	0.37	0.40	0.37	0.41	0.67
(Nb/La) <sub>n</sub>	0.24	0.22	0.13						0.04	0.06
Zr/Y	57.5	32.5	55.8	21.6	39.8	19.4			39.2	44.0

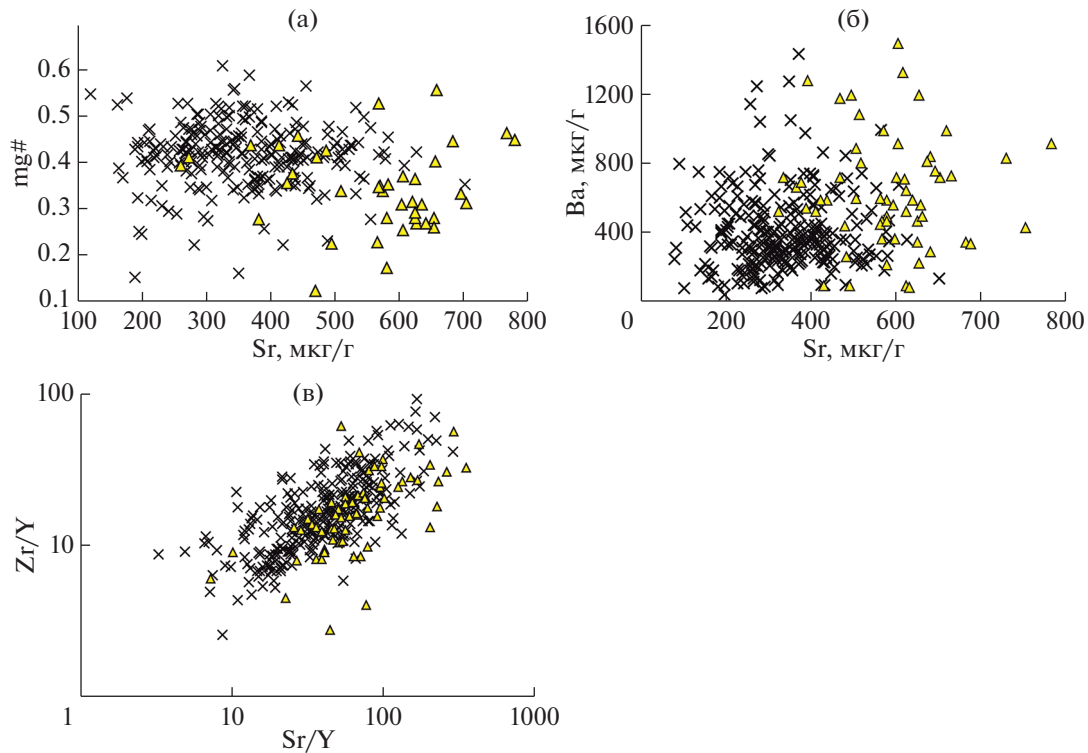
Примечание. Источники: 1 – оригинальные данные; 2 – данные ГГУП СФ “Минерал”; 3 – Huhma et al., 2012a; 4 – Samsonov et al., 2005; 5 – Jahn et al., 1984; 6 – Mutanen, Huhma, 2003.



**Рис. 3.** Диаграммы  $(La/Yb)_n$ – $(Yb)_n$  (а) и  $Sr/Y$ – $Y$  (б) для тоналитов с возрастом ~3240 и ~3150 млн лет и мультиэлементные диаграммы (спайдерграммы) для нормированных на примитивную мантию (по Sun, McDonough, 1989) средних составов тоналитов с возрастом около 3240, 3150 и 2900 млн лет (в).



**Рис. 4.** Мультиэлементные диаграммы (спайдерграмма) для нормированных на примитивную мантию (по Sun, McDonough, 1989) средних составов тоналитов с возрастом 3150 и 2850 млн лет.



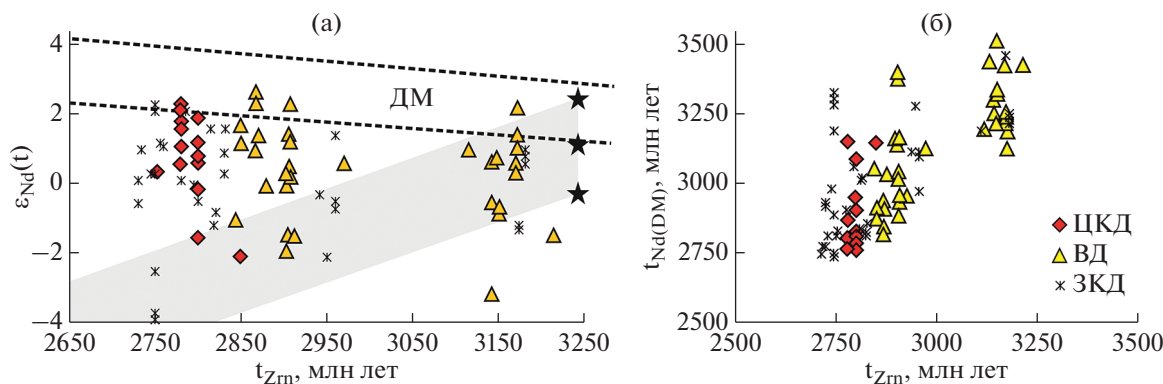
**Рис. 5.** Диаграммы Sr–mg# (а), Sr–Ba (б), Zr/Y–Sr/Y (в) для пород ТТГ-ассоциации мезоархейского (крестик) и неоархейского (треугольник) возраста Карельской провинции.

также Zr и, соответственно, более высокими отношениями Zr/Y, Sr/Y, La/Yb, более низкой магнезиальностью mg# (рис. 5, табл. 2, 3). Различие составов ТТГ неоархея, слагающих Центрально-Карельский домен, и мезоархейских пород соседних доменов свидетельствует, в первую очередь, о различном составе источников ТТГ-расплавов (Чекулаев, Арестова, 2018).

При петрологических и геотектонических реконструкциях широко используется Sm–Nd изотопная систематика. К. Конди (Condie, 1986) на основании изотопных данных по Nd, Sr и Pb пришел к выводу, что архейские ТТГ-ассоциации образовались из источника, который отделился от мантии примерно за 150 млн лет до его плавления. Вывод о существовании такого временного интервала был также получен и при анализе Hf изотопной системы в цирконах из ТТГ-ассоциаций различных кратонов мира (Bennett, 2003).

К настоящему времени накоплен значительный объем информации об изотопном составе Nd в породах ТТГ-серии Фенноскандинавского щита (Чекулаев и др., 1997; Вревский и др., 2010; Nuhma et al., 2012b). Породы ТТГ-ассоциации Карельской провинции Фенноскандинавского щита, как и породы других архейских кратонов, характеризуются варьирующими значениями  $\epsilon_{Nd}(t)$  от  $-6.6$  до  $+2.7$  (рис. 6а). Диаграмма в координатах

$t_{Zr_m} - t_{Nd(DM)}$  (рис. 6б) демонстрирует различные интервалы между становлением их протолита (отделением его от деплетированной мантии) и последующим его плавлением с образованием расплавов ТТГ-состава (Лобач-Жученко и др., 1999; Вревский и др., 2010). В большей степени это характеризует тоналит-трондъемиты Водлозерского домена, формирование которых происходило в четыре этапа: около 3.2, 3.15, 2.9 и 2.85 млрд лет назад. Sm–Nd изотопные данные свидетельствуют о том, что ТТ-магматизму каждого этапа предшествует формирование нового протолита, при этом часть новообразованных ТТГ наследует изотопный состав более древних источников, сформировавшихся в предыдущие этапы (рис. 6б). Тоналит-трондъемит-гранодиориты Западно-Карельского домена, судя по вариациям значений  $\epsilon_{Nd}(t)$  (от  $-7.5$  до  $+2.3$ ; Nuhma et al., 2012b), также имели разные по возрасту источники. Тоналит-трондъемит-гранодиориты Центрально-Карельского домена (за исключением единичных образцов) отличаются преимущественно положительными значениями  $\epsilon_{Nd}(t)$  ( $+0.6...+2.3$ ; рис. 6а), указывающие на близость возраста протолита и времени его плавления. Тоналит-трондъемит-гранодиориты с наименьшими значениями  $\epsilon_{Nd}(t)$  могли сформироваться в результате переработки более древних ТТГ-пород, как это было показано для трондъемитов Водлозерского домена с возрастом  $\sim 2.9$  млрд лет и



**Рис. 6.** Диаграммы (а) возраст по циркону ( $t_{Zrn}$ )— $\epsilon_{Nd}(t)$  и (б) возраст по циркону ( $t_{Zrn}$ )—модельный возраст ( $t_{Nd(DM)}$ ), рассчитанный на деплетированную мантию по DePaolo (1981), для архейских ТТГ-пород Карельской провинции. ЦКД — Центрально-Карельский домен, ВД — Водлозерский домен, ЗКД — Западно-Карельский домен. На рис. 6а показан состав амфиболитов района р. Водла Водлозерского домена (черные звездочки) и поле эволюции их изотопного состава Nd (залито серым).

$t_{Nd(DM)} \sim 3.1\text{--}3.3$  млрд лет (Чекулаев, 1988; Арестова и др., 2015). Другим объяснением отрицательных значений  $\epsilon_{Nd}(t)$  может быть контаминация древнекоревым материалом или нарушение Sm—Nd изотопной системы.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Многими исследователями в качестве главного источника ТТ-расплавов рассматриваются породы основного состава, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Наблюдаемый интервал времени между образованием протолита (отделением от мантийного источника) и моментом его плавления с образованием ТТ-расплавов, о чем говорилось выше, свидетельствует о преобладающем механизме выплавления ТТГ-пород Карельской провинции из значительно более древних базитовых источников, чем базальты зеленокаменных поясов.

Изотопный состав Sm и Nd также указывает на отсутствие петрогенетической связи между вулканидами зеленокаменных поясов и ТТГ-породами. Проведенный расчет допустимого значения отношения Sm/Nd для базитового источника ТТГ показал (Лобач-Жученко и др., 1999; Вревский и др., 2010), что оно не должно было превышать 0.27—0.30. Такими геохимическими характеристиками обладают мафиты, обогащенные Nd (ENd-мафиты) (Kempton et al., 1995; Корешкова и др., 2001; Ветрин, 2006), тогда как в базальтах мезоархейских поясов эти отношения превышают 0.30 (см. табл. 2 в Чекулаев и др., 2018). Соответственно ТТ-расплавы не могли быть выплавлены из метабазитов состава мезоархейских базальтов Карелии; их источнику больше соответствуют базиты нижней коры или ранние амфиболиты Водлозерского домена с возрастом около 3.24 млрд лет (Лобач-Жученко и др., 1999; Вревский и др., 2010; Чеку-

лаев и др., 2018). Вывод об ином составе источника для пород ТТГ-серии, нежели толеиты зеленокаменных поясов, подтверждается результатами петрологического моделирования по главным и редким элементам, проведенного для тоналитов района р. Выг (Лобач-Жученко и др., 1999). Высокие отношения Sr/Y (около 70) и  $(La/Yb)_n$  ( $>60$ ) указывают на значительные глубины образования расплавов.

Как уже отмечалось, трондьемиты с возрастом около 2900 млн лет по содержаниям и соотношениям редких и редкоземельных элементов близки к тоналитам с возрастом 3150 млн лет, что предполагает их образование в результате плавления тоналитов (Чекулаев, 1988; Арестова и др., 2015). Это подтверждается геологическими наблюдениями, а также изотопным составом Nd, согласно которому источник пород имеет возраст 3130—3150 млн лет, и наличием в трондьемитах ксеногенного циркона, соответствующего по морфологии и составу таковому в тоналитах (Арестова и др., 2017).

В отличие от мезоархейских базальтов, метабазальты неархейских поясов Карельской провинции удовлетворяют требованиям источника ТТ-расплавов (Чекулаев и др., 2018), так как отношения Sm/Nd в них не превышают 0.30. Кроме того, они в достаточной мере обогащены литофильными элементами, в частности Sr. Несмотря на то что изотопные данные указывают на незначительный интервал времени между формированием ТТГ и базитов зеленокаменных поясов, геологические данные свидетельствуют о более молодом возрасте метавулканидов, которые, соответственно, не могли быть источником ТТ-расплавов.

Возможные модели образования ТТГ-расплавов рассматривались многими исследователями. В основном обсуждаются два принципиально различных типа моделей образования ТТГ-пород древних кратонов: (1) субдукционная — плавление

ние метаморфизованных базальтов океанических литосферных плит, фрагменты которых представлены толеитами зеленокаменных поясов (Павловский, 1962; O'Brien et al., 1993; Кожевников, 2000; Campbell, 2003; Samsonov et al., 2005; Светов, 2005; Щипанский, 2008), или погружение архейской сиалической коры в горячую верхнюю мантию с образованием эклогитов (Щипанский, 2012); (2) плюмтектоническая – плавление нижней части мощной мафитовой коры (Atherton, Petford, 1993; Condie, 2005; Вревский и др., 2010; Арестова и др., 2012, 2015; Чекулаев и др., 2018) с последующим разрастанием сиалических ядер (Condie, 1986; Kramers, 1988).

В качестве одного из аргументов в пользу первой модели приводится сходство некоторых тоналитов с адакитами – образованиями островных дуг. В частности, Дж.-Ф. Мойен и Е. Мартен (Moyen, Martin, 2012) вслед за рядом исследователей (например, Drummond, Defant, 1990) на основании магнезиальности и содержаний ряда редких элементов сопоставляют тоналиты с адакитами (Martin, 1999; Martin et al., 2005; Moyen, 2009). Повышенные содержания MgO, Cr, Ni в ТТГ и адакитах по сравнению с экспериментальными расплавами они объясняют взаимодействием ТТ-расплавов с мантийным клином в субдукционной обстановке (Moyen, Martin, 2012).

Что касается магнезиальности ( $mg\# = MgO/FeO + MgO$ , мол. кол.) ТТ-расплавов, то эксперименты показывают, что ее значения широко варьируют от 0.20 до 0.70 при средних значениях 0.35–0.40. Это может зависеть как от минерального состава рести́та, так и от состава рести́товых минералов. Например, эксперименты Д. Замора (Zamora, 2000) демонстрируют вариации значений  $mg\#$  в минералах в зависимости от температуры и давления. Более высокую магнезиальность ТТ-пород может обеспечить более низкая температура плавления источника, когда кристаллизуется более железистый гранат, либо наличие в рести́те подчиненного количества клинопироксена или роговой обманки (наиболее магнезиальных минеральных фаз) (Вревский и др., 2010). Подобное влияние состава рести́товых фаз уже отмечалось (Туркина, 2000; Laurie, Stevens, 2012 и др.). Одновременно было показано (Smithies, 2000; Condie, 2005; Чекулаев и др., 2018; Чекулаев, Арестова, 2018), что ТТГ не являются аналогами адакитов, которые обнаруживают существенные геохимические отличия, в частности высокие ( $>0.60$ ) значения  $mg\#$  и содержания Sr более 1000 мкг/г (Чекулаев и др., 2018).

Ведущую роль субдукции в образовании ТТГ-пород опровергают также результаты экспериментальных работ и петролого-геохимических модельных расчетов (Rapp et al., 1991, 1999; Springer, Seck, 1997; Lobach-Zhuchenko et al., 2000), показываю-

щие, что в надсубдукционных обстановках генерируются расплавы, существенно отличающиеся от природных ТТГ высокой магнезиальностью и низкими содержаниями  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  (Вревский и др., 2010).

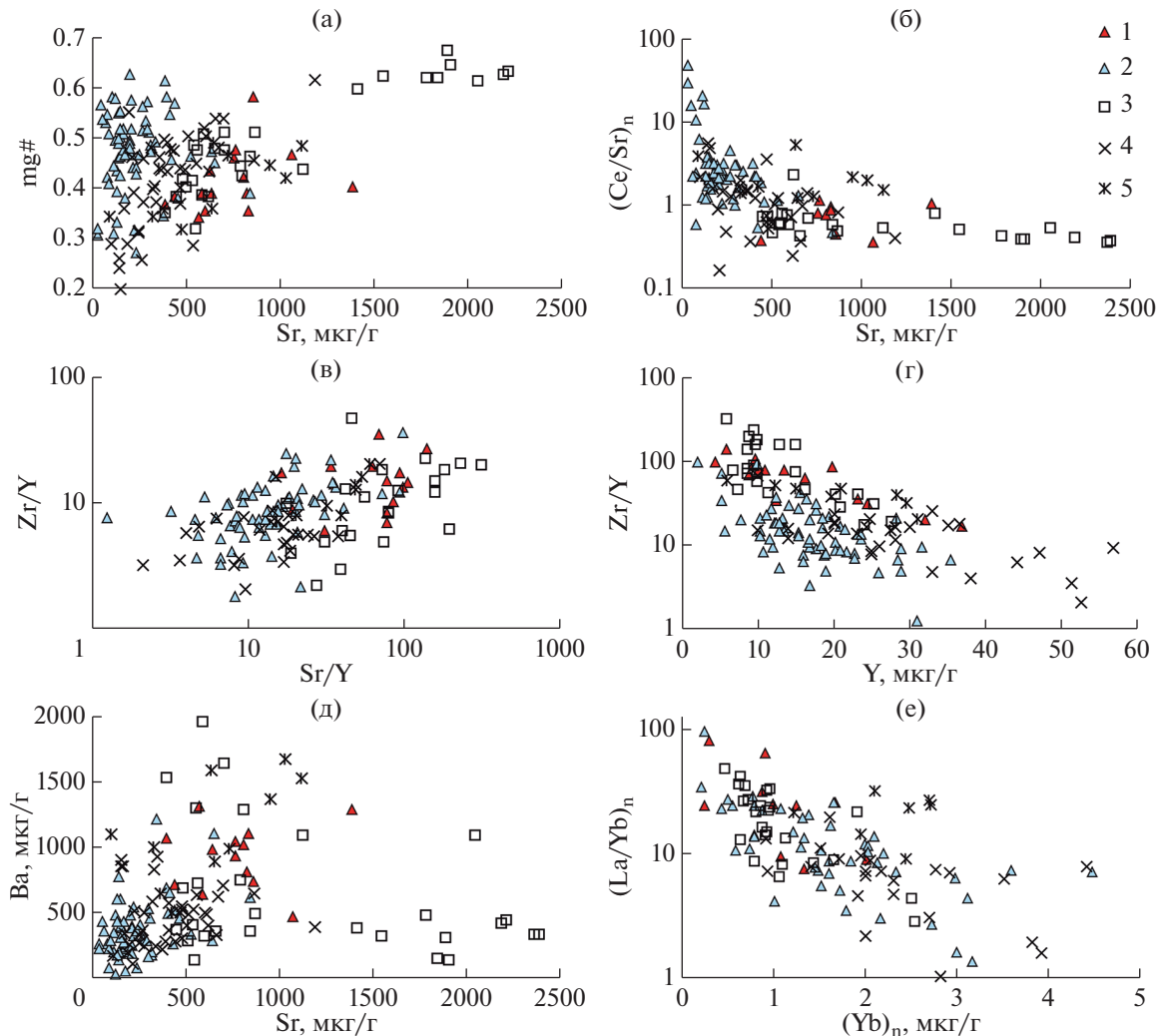
Против субдукционной модели образования ТТГ Карелии свидетельствует также сравнение их состава с составами плагиигранитоидов и вулканитов современных геодинамических обстановок, которое показало (Чекулаев, 2009; Вревский и др., 2010), что архейские ТТГ заметно отличаются от фанерозойских плагиигранитоидов не только формой и размерами массивов, но и рядом геохимических особенностей. Так, фанерозойские плагиигранитоиды содержат заметно больше HREE, Sc, Y и Ti (Condie, 1986; Чекулаев, 2009). Кроме того, мезоархейские ТТГ Карелии близки по составу к вулканитам, которые демонстрируют заметное отличие от вулканитов современных геодинамических обстановок (рис. 7) (см. рис. 8 в Чекулаев и др., 2018). В то же время неоархейские вулканиты Карельской провинции, аналогичные по составу и возрасту неоархейским ТТГ, отличаясь от современных островодужных вулканитов, имеют определенное сходство с вулканитами современных континентальных дуг (рис. 7) (Чекулаев, 2009; Чекулаев и др., 2018).

Таким образом, перечисленные выше особенности геологического строения, изотопного и геохимического состава архейских ТТГ-серий Карельской провинции в совокупности с петрологическими и экспериментальными данными, модельными расчетами наиболее полно могут быть объяснены в рамках модели их образования в результате плавления мафитов нижней коры под воздействием плюма, который мог проявляться как минимум дважды (Вревский и др., 2010; Арестова и др., 2012, 2015; Чекулаев, Арестова, 2018). При этом неоархейские плутонические и магматические породы заметно отличаются по составу от мезоархейских пород, вероятно отражая смену условий образования расплавов (Чекулаев и др., 2018; Чекулаев, Арестова, 2018).

## ВЫВОДЫ

Краткое обобщение имеющихся на сегодняшний день данных для пород архейской тоналит-трондъемит-гранодиоритовой ассоциации Карельской провинции Фенноскандинавского щита позволило определить особенности геологического положения и геохимического состава пород архейской ТТГ-ассоциации Карельской провинции, сформированных в течение основных этапов с возрастом около 3240, 3150, 2900, 2850, 2800 и 2750 млн лет.

Наиболее ранние ТТГ-расплавы могли быть выплавлены не из метабазитов состава мезоар-



**Рис. 7.** Парные диаграммы средних значений Sr–mg#, Zr/Y–Sr/Y, Sr–Ba, Sr–(Ce/Sr)<sub>n</sub>, Y–Sr/Y, (Yb)<sub>n</sub>–(La/Yb)<sub>n</sub> для средне-кислых вулканитов отдельных структур и комплексов неoarхея (1) и мезoarхея (2) Карельской провинции; для вулканитов современных обстановок: адакитов (3), островных дуг (4), континентальных дуг (5).

хейских базальтов зеленокаменных поясов Карелии, а из базитов нижней коры или ранних амфиболитов Водлозерского домена с возрастом около 3.24 млрд лет.

Тоналиты с возрастом около 3150 млн лет отличаются от более ранних тоналитов повышенными содержаниями K<sub>2</sub>O, Rb, Y, REE, ΣREE и более низкими отношениями Sr/Y и (La/Yb)<sub>n</sub>, что может отражать как иной состав источника, так и менее глубинные условия образования расплавов.

Трондьемиты с возрастом около 2900 млн лет по соотношению редких и редкоземельных элементов близки к тоналитам основания с возрастом около 3150 млн лет, что в сочетании с геологическими наблюдениями предполагает их образование в результате плавления тоналитов и подтверждается присутствием в них древнего ксеногенного циркона, соответствующего по мор-

фологии и составу таковому в более древних тоналитах.

Неoarхеийские плутонические и магматические породы заметно отличаются по составу от мезoarхеийских, вероятно, отражая смену условий их образования.

Особенности геологического строения, химического состава и изотопной эволюции ε<sub>Nd</sub>(t) включают предположение о формировании большей части ТТГ из толеитов зеленокаменных поясов, т.е. об их генетической связи с субдукцией древней океанической коры, и наиболее полно могут быть объяснены в рамках модели их образования в результате плавления мафитов нижней коры под воздействием плюма.

Сравнение состава архейских ТТГ с составами плагиогранитоидов современных геодинамических обстановок показало, что они заметно отличаются от фанерозойских плагиогранитоидов не



только масштабами проявления, но и рядом геохимических особенностей. Так, фанерозойские плагиогранитоиды содержат заметно больше HREE, Sc, Y и Ti.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках госзадания Института геологии и геохронологии докембрия РАН (тема FMUW-2022-0004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Матвеева Л.В., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А.* Новые данные о возрасте архейских пород Водлозерского домена (Балтийский щит) и их значение для геодинамических реконструкций // Докл. АН. 2012. Т. 442. № 1. С. 67–73.
- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Кучеровский Г.А.* Корреляция процессов формирования архейской коры древнего Водлозерского домена (Балтийский щит) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 2. С. 1–13.
- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Кучеровский Г.А., Егорова Ю.С., Скублов С.Г.* О соответствии геологических данных и результатов датирования архейских пород U–Pb методом по циркону на примере Карельской провинции Балтийского щита // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 35–52.
- Ветрин В.Р.* Состав и строение нижней коры Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит // Петрология. 2006. Т. 14. № 4. С. 415–438.
- Вревский А.Б., Лобач-Жученко С.Б., Чекулаев В.П., Коваленко А.В., Арестова Н.А.* Геологические, петрологические и изотопно-геохимические ограничения геодинамических моделей образования тоналит-трондъемит-гранодиоритовых ассоциаций древних кратонов // Геотектоника. 2010. № 4. С. 20–38.
- Кожевников В.Н.* Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: Изд-во Кар. НЦ РАН, 2000. 222 с.
- Кожевников В.Н., Скублов С.Г.* Детритовые цирконы из архейских кварцитов Маткалахтинского зеленокаменного пояса, Карельский кратон // Докл. АН. 2010. Т. 430. № 5. С. 681–685.
- Корешкова М.Ю., Левский Л.К., Иваников В.В.* Петрология нижнекорковых ксенолитов из даек и трубки взрыва Кандалакшского грабена // Петрология. 2001. Т. 9. С. 89–106.
- Куликов В.С., Симон А.К., Куликова В.В., Самсонов А.В., Кайряк А.И., Ганин В.А., Зудин А.И.* Эволюция магматизма Водлозерского блока Карельской гранит-зеленокаменной области в архее // Геология и геохронология докембрия Восточно-Европейской платформы. Л.: Наука, 1990. С. 92–100.
- Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Левченко О.А., Крылов И.Н., Левский Л.К., Богомолов Е.С., Коваленко А.В.* Эволюция Южно-Выгозерского зеленокаменного пояса Карелии // Петрология. 1999. Т. 7. № 2. С. 156–173.
- Лобач-Жученко С.Б., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Левский Л.К., Коваленко А.В.* Архейские террейны Карелии: их геологическое и изотопно-геохимическое обоснование // Геотектоника. 2000. № 6. С. 26–42.
- Павловский Е.В.* О специфике стиля тектонического развития земной коры в раннем докембрии // Тр. Вост.-Сиб. геол. ин-та СО АН СССР. 1962. Вып. 5. С. 77–108.
- Ранний докембрий Балтийского щита. Ред. Глебовицкий В.А. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Светов С.А.* Магматические системы зоны перехода океан–континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Изд-во Кар. НЦ РАН, 2005. 230 с.
- Слабунов А.И.* Керетская гранит-зеленокаменная система Карелии // Геотектоника. 1993. № 5. С. 61–74.
- Туркина О.М.* Модельные геохимические типы тоналит-трондъемитовых расплавов и их природные эквиваленты // Геохимия. 2000. № 7. С. 704–717.
- Чекулаев В.П.* Особенности структурно-метаморфической эволюции зеленокаменных поясов. Деформации и метаморфизм лопийских образований Западной Карелии // Зеленокаменные пояса фундамента Восточно-Европейской платформы (геология и петрология вулканитов). М.: Наука, 1988. С. 62–68.
- Чекулаев В.П.* Архейские гранитоиды Карелии и их роль в формировании континентальной коры Балтийского щита. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. СПб., 1996. 42 с.
- Чекулаев В.П.* Геология и состав архейских TTG и плагиогранитов фанерозойских геодинамических обстановок: сходство и отличие // Гранит-зеленокаменные системы архея и их поздние аналоги. Материалы научной конференции. Петрозаводск, 2009. С. 176–179.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А.* Гетерогенность строения Карельской провинции Фенноскандинавского щита как отражение условий корообразования от палео- до неоархея // Эволюция вещественного и изотопного состава докембрийской литосферы. Ред. Глебовицкий В.А., Балтыбаев Ш.К. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2018. С. 35–61.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А.* Архейские метатерригенные осадочные породы Карельской провинции: геологическое положение, геохимия, источники сноса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2020. Т. 28. № 4. С. 3–25.
- Чекулаев В.П., Глебовицкий В.А.* О среднем составе ТТГ (тоналит-трондъемит-гранодиоритовой) ассоциации: возможности использования // Докл. АН. 2017. Т. 472. № 2. С. 192–196.
- Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Левский Л.К.* Архейские граниты Карелии как показатели состава и возраста континентальной коры // Геохимия. 1997. № 8. С. 808–816.
- Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Гусева Н.С., Коваленко А.В., Крылов И.Н.* Архейский магматизм северо-западной окраины древнего Водлозерского домена, район оз. Остер (геология, геохимия, петрология) // Петрология. 2002. Т. 10. № 2. С. 138–167.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Коваленко А.В., Слабунов А.И.* Карельская гранит-зеленокаменная область. Центральное-Карельский домен // Ранний докембрий Балтийского щита. Ред. Глебовицкий В.А. СПб.: Наука, 2005. С. 395–471.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Глебовицкий В.А., Лобач-Жученко С.Б., Матвеева Л.В., Лепехина Е.Н.* Новые данные о возрасте архейских пород Заонежья (Водло-

- зерский домен Карельского кратона) // Докл. АН. 2013. Т. 451. № 6. С. 670–675.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С., Кучеровский Г.А.* Изменение условий формирования коры Карельской провинции Балтийского щита при переходе от мезо- к неогархею: результаты геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26. № 3. С. 3–23.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С.* Неогархейские граниты Карельской провинции: геологическое положение, геохимия, происхождение // Региональная геология и металлогения. 2020. № 81. С. 21–39.
- Щипанский А.А.* Субдукционные и мантийно-плюмовые процессы в геодинамике формирования архейских зеленокаменных поясов. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 560 с.
- Щипанский А.А.* Субдукционная геодинамика в архее и формирование алмазоносных литосферных килей и ранней континентальной коры кратонов // Геотектоника. 2012. № 2. С. 42–64.
- Atherton M.P., Petford N.* Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust // Nature. 1993. V. 362. P. 144–146.
- Bennett V.C.* Compositional evolution of the mantle // Treatise on geochemistry. V. 2. The mantle and core. Eds. Holland D., Turekian K.K. Elsevier, 2003. P. 493–519.
- Campbell I.H.* Constraints on continental growth models from Nd/U ratios in the 3.5 Ga Barberton and other Archean basalt-komatiite suites // Am. J. Sci. 2003. V. 303. P. 319–351.
- Condie K.C.* Origin and early growth rate of continents // Precambrian. Res. 1986. V. 32. № 4. P. 261–278.
- Condie K.C.* High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. P. 491–504.
- DePaolo D.J.* Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust mantle evolution 976 in the Proterozoic // Nature. 1981. V. 291. P. 193–196.
- Drummond M.S., Defant M.J.* A model for trondhjemite–tonalite–dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 21503–21521.
- Huhma H., Mänttari I., Peltonen P., Kontinen A., Halkoaho T., Hanski E., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Layahe Y., Luukkonen E., Pietikäinen K., Pulkkinen A., Sorjonen-Ward P., Vaasjoki M., Whitehouse M.* The age of the Archean greenstone belts of Finland // Geol. Surv. Finl. Spec. Pap. 2012a. V. 12. P. 73–174.
- Huhma H., Kontinen A., Mikkola P., Halkoaho T., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Luukkonen E., Mutanen T., Peltonen P., Pietikäinen K., Pulkkinen A.* Nd isotopic evidence for Archean crustal growth in Finland // Geol. Surv. Finland. Spec. Pap. 2012b. V. 12. P. 175–212.
- Jahn B.M., Vidal P., Kroner A.* Multi-chronometric ages origin of Archean tonalitic gneisses in Finnish Lapland: a case for long crustal residence time // Contrib. Mineral. Petrol. 1984. V. 86. P. 398–408.
- Kempton P.D., Downes H., Sharkov E.V., Vetrin V.R., Ionov D.A., Carswell D.A., Beard A.* Petrology and geochemistry of xenoliths from the Northern Baltic Shield: evidence for partial melting and metasomatism in the lower crust beneath an Archean terrane // Lithos. 1995. V. 36. P. 157–184.
- Kramers J.D.* An open-system fractional crystallization model for very early continental crust formation // Precambrian Res. 1988. V. 38. P. 281–295.
- Laurie A., Stevens G.* Water-present eclogite melting to produce Earth's early felsic crust // Chem. Geol. 2012. V. 314–317. P. 83–95.
- Lobach-Zhuchenko S.B., Kovalenko A.V., Krylov I.N., Levskii L.K., Bogomolov E.S.* Geochemistry and petrology of the ancient Vygozero Granitoids, Southeastern Karelia // Geochem. Int. 2000. V. 38. Suppl. 1. P. 584–599.
- Martin H.* The adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids // Lithos. 1999. V. 46. P. 411–429.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R.P., Moyen J.-F., Champion D.C.* An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. V. 79. P. 1–24.
- Moyen J.-F.* High Sr/Y and La/Yb ratios: the meaning of the “adakitic signature” // Lithos. 2009. V. 112. P. 556–574.
- Moyen J.-F., Martin H.* Forty years of TTG research // Lithos. 2012. V. 148. P. 312–336.
- Mutanen T., Huhma H.* The 3.5 Ga Siurua trondhjemite gneiss in the Archean Pudasjarvi Granulite Belt, northern Finland // Bull. Geol. Soc. Finl. 2003. V. 75. P. 51–68.
- O'Brien H., Huhma H., Sorjonen-Ward P.* Petrogenesis of the late Archean Hattu schist Belt, Ilomantsi, Eastern Finland: geochemistry and Sr, Nd isotopic composition // Geological development, gold mineralization and exploration methods in the late Archean Hattu schist Belt, Ilomantsi, Eastern Finland. Geol. Surv. Finl. Spec. Pap. 1993. V. 17. P. 147–184.
- Paavola J.* A communication of the U–Pb and K–Ar age relations of the Archean basement in the Lapinlahti–Varpaisjarvi areas, Central Finland // Geol. Surv. Finl. Bull. 1986. V. 339. P. 7–15.
- Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F.* Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities // Precambrian. Res. 1991. V. 51. P. 1–25.
- Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S.* Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa // Chem. Geol. 1999. V. 160. P. 335–356.
- Samsonov A.V., Bogina M.M., Bibikova E.V., Petrova A.Ju., Shchipansky A.A.* The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield // Lithos. 2005. V. 79. P. 83–106.
- Smithies R.H.* The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTT) series is not an analogue of Cenozoic adakite // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 182. P. 115–125.
- Springer W., Seck H.A.* Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas // Contrib. Mineral. Petrol. 1997. V. 127. P. 30–45.
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Eds. Saunders A.D., Norry M.J. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
- Zamora D.* Fusion de la croûte océanique subductée: approche expérimentale et géochimique. Université Thesis Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, 2000. 314 p.

Рецензент А.Б. Кузнецов

## The Archaean Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Association of the Karelian Province: Geology, Geochemistry, Stages and Conditions of Formation

V. P. Chekulaev<sup>a, #</sup>, N. A. Arestova<sup>a</sup>, and Yu. S. Egorova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Science, Saint-Petersburg, Russia

<sup>#</sup>e-mail: vpchekulaev@mail.ru

Based on the available geochronological data, within the Karelian Province of the Fennoscandian Shield, the main stages of the formation of Archean rocks of the tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) association with ages about 3240, 3150, 2900, 2850, 2800 and 2750 Ma are identified and characterized. The distinctive features of their geological position and chemical composition are shown. For example, early TTG melts could have been melted not from basalts of the greenstone belts of Karelia, but from basites of the lower crust composition or early amphibolites of the Vodlozersky domain. Features of the geological position, chemical composition and isotopic evolution of the  $\epsilon_{Nd}(t)$  do not support the assumption of the formation of most of the TTGs from the tholeites of the greenstone belts, thus excluding their genetic connection with the subduction of the ancient oceanic crust. The most acceptable model seems to be the formation of TTGs in the Karelian Province as a result of melting of mafites of the lower crust under the influence of plume. Archean TTGs differ markedly from Phanerozoic plagiogranitoids not only in the shape and size of the massifs, but also in a number of geochemical features, in particular, lower HREE, Sc, Y and Ti contents.

*Keywords:* Fennoscandian Shield, Karelian Province, Archaean, tonalite-trondhjemite-granodiorite association, geology, geochemistry, stages, conditions of formation