

УДК 552.323+552.125.3

## ДРЕВНЕЙШЕЕ ВУЛКАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО В БОНИНИТОПОДОБНЫХ ЛАВАХ РАННЕГО ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ, КАРЕЛЬСКИЙ КРАТОН: РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2003 г. Е. В. Шарков, Н. В. Трубкин, И. С. Красивская,  
академик О. А. Богатилов, А. В. Мохов, Е. В. Золотых,  
В. М. Ладыгин, А. В. Чистяков, К. А. Евсеева

Поступило 10.02.2003 г.

Вулканические породы раннего докембрия, как правило, сильно изменены наложенными процессами и сохраняют свой первичный состав и структурные особенности только в исключительных случаях. Одним из таких случаев являются раннепалеопротерозойские эффузивы свиты Ветреный Пояс в одноименной рифтогенной структуре в юго-восточной Карелии, где местами сохранилось вулканическое стекло [1–3]. Этими же исследователями различными методами (Sm–Nd, Re–Os и U–Pb (по циркону)) был определен и возраст вулканических пород свиты, составивший от 2.5 млрд. лет в нижних частях ее разреза до 2.41 млрд. лет в верхних.

Е.Б. Золотых и В.М. Ладыгин [4, 5] также подтвердили наличие в породах вулканического стекла. Дополнительный каменный материал по этим породам был собран нами в 2000 г. в процессе кратковременных полевых работ в самой юго-восточной части грабенообразной структуры Ветреный Пояс, где сохранились наиболее свежие породы. Обработка этого материала производилась преимущественно в ИГЕМ РАН.

До наших работ факт существования вулканического стекла в этих породах обосновывался только петрографическими методами, что вызвало необходимость привлечения современных локальных физических методик для его более надежной диагностики.

Общие сведения о геологическом положении структуры Ветреный Пояс и слагающих ее породах. В те-

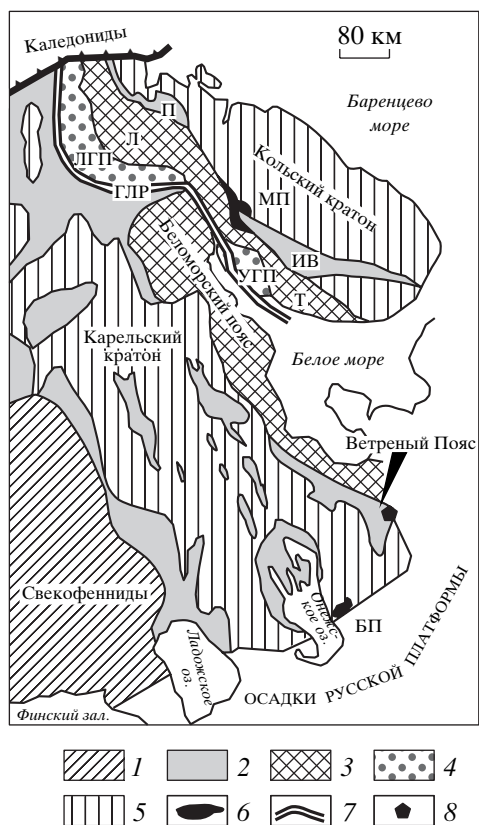
чение раннего палеопротерозоя (2.5–2.3 млрд. лет назад) на территории восточной части Балтийского щита сформировалась крупная магматическая провинция кремнеземистой высокомагнезиальной (бонинитоподобной) серии (КВМС) [6], образованная расслоенными базит-ультрабазитовыми интрузивами, роями даек и вулканогенно-осадочными комплексами в грабенообразных структурах, одной из которых являлся Ветреный Пояс (рис. 1). По своему геологическому положению и масштабам развития эта провинция была близка к крупным магматическим провинциям фанерозоя, связанным с активностью суперплюмов, таким, например, как Сибирские траппы, но резко отличалась от них составом слагающих ее пород. Во время свекофенских тектонических процессов (2.0–1.9 млрд. лет назад) породы провинции неравномерно подверглись динамо-метаморфическим преобразованиям [7], причем наименьшие изменения претерпела структура Ветреного Пояса, где местами сохранились практически неизмененные породы.

Нами изучены породы верхней части разреза свиты Ветреного Пояса на юго-восточном окончании структуры в районе горы Мяндуха. Здесь находится вулканическая постройка, в которой выделяются семь положозалегающих базальтовых потоков общей мощностью около 200 м. Судя по присутствию пиллоу-лав и гиалокластитов, излияние лав происходило в подводных условиях. В процессе последующих преобразований породы неравномерно подверглись низкотемпературным изменениям с появлением волокнистого актинолита, хлорита, серпентина и т.д. Однако среди них местами встречаются исключительно свежие разновидности, где сохранились как первично-магматические минералы, так и вулканическое стекло.

Породы часто имеют порфирированную структуру с вкрапленниками оливина, реже пироксена, а также микрофенокристами хромита. Наиболее

*Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии  
Российской Академии наук, Москва*

*Российский университет дружбы народов, Москва  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Москва*



**Рис. 1.** Схема геологического строения восточной части Балтийского щита. 1 – Свекофенский блок; 2 – палеопротерозойские вулканогенно-осадочные пояса (в том числе П – Печенгский, ИВ – Имандра-Варзугский); 3 – подвижные пояса: Беломорский и Терско(Т)-Лоттинский(Л); 4 – Лапландско-Умбинский гранулитовый пояс (ЛПП – Лапландский и УТП – Умбинский фрагменты); 5 – архейские кратоны; 6 – раннепротерозойские расслоенные интрузивы (МП – Мончегорский и БП – Бураковский плутоны); 7 – Главный Лапландский разлом; 8 – местоположение горы Мяндуха.

примечательной особенностью основной массы пород являются структуры типа микроспинифекс, характеризующиеся развитием игольчатых длиннопризматических выделений, радиально-лучистых и метельчатых агрегатов клинопироксена, реже плагиоклаза, а также скелетных форм оливина и пироксена в вулканическом стекле. В наиболее раскристаллизованных разновидностях отмечается основной плагиоклаз. Составы пород приведены в табл. 1.

Свежий оливин как в спинифекс-структурах, так и в порфириновых выделениях имеет состав от  $Fo_{80}$  до  $Fo_{63}$ . Состав клинопироксена отвечает высокоглиноземистому авгиту  $Wo_{45-47}En_{40-41}Fs_{11-14}$  с содержанием  $Al_2O_3$  от 7.2 до 7.5 мас.%, пижониту  $Wo_{11}En_{60}Fs_{29}$  при содержании  $Al_2O_3$  4.8 мас.% и пижонит-авгиту  $Wo_{32-38}En_{48-54}Fs_{14-15}$  при  $Al_2O_3$  1.5–2.0. Хромшпинель представлена алюмохромитом с

содержанием  $Cr_2O_3$  от 43.5 до 45.1 мас.%, а плагиоклаз отвечает составу  $Or_{0.7-0.8}Ab_{35.6-36.8}An_{62.5-63.6}$ . Такие составы минералов обычны для высококальциевых бонинитовых лав, в частности встречающихся в позднемерловых офиолитовой ассоциации Бассит в Сирии [8].

Вулканическое стекло в шлифе в проходящем свете бурое и изотропное в поляризованном. В гиалокластитах оно имеет флюидально-полосчатую текстуру, а в базальтах слагает матрицу между кристаллами оливина, пироксенов и плагиоклаза. Стекло имеет пятнистый облик в отраженных электронах (рис. 2) и, согласно микрозондовым определениям, переменный химический состав, варьирующий от базальта ( $SiO_2$  50–54 мас.%) до андезита ( $SiO_2$  56–60 мас.%) (табл. 1, ан. 4–9). Результаты его электронно-микроскопического изучения приведены ниже.

Методика работ. Зоны (участки) пятнистого вулканического стекла механически извлекались из шлифа, а полученный материал использовался для приготовления электронно-микроскопических суспензионных препаратов. Диагностика частиц стекла и заключенных в нем кристаллических фаз проводилась на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100С, оборудованном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром “Кевех-5100”, позволяющим фиксировать элементы от Na до U. При наклонах препарата с помощью гониометра среди преобладающей массы аморфных частиц стекла выявлялись кристаллические фазы, которые при таких наклонах формируют “бегающие” по кристаллу экстинкционные контуры. Благодаря этой особенности кристаллических соединений достигалась полная диагностика всех фаз, присутствующих в препарате. От частиц затем получали изображение, серии картин дифракции электронов, а также энергодисперсионный спектр. На основе полученных структурных данных и химического элементного состава минерала проводилась его достоверная диагностика.

Результаты изучения. При исследовании суспензионных препаратов стекла из двух образцов в электронном микроскопе было установлено, что среди многочисленных аморфных частиц  $SiO_2$  (с примесью K) содержатся также ультрамелкие кристаллы, на энергодисперсионных рентгеновских спектрах которых фиксировались пики Si, Ca, Fe (и, возможно, Al). Многочисленные частицы стекла в суспензионном электронно-микроскопическом препарате представлены двумя морфологически различными выделениями: 1) толстые, часто клиновидной формы с острыми краями, однородные по строению аморфные частицы  $SiO_2$  (рис. 2); в них отмечается значительная примесь K, как это следует из данных по спектрам энергодисперсионного рентгеновского спек-

**Таблица 1.** Составы базальтов и вулканического стекла в них (свита Ветреный Пояс, гора Мяндуха)

№ ан.	№ обр.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	303, вал.	51.75	0.59	12.60	10.64	0.18	11.20	8.48	2.05	0.69	0.09	0.09	98.36
2	ВП33, »	51.83	0.68	9.94	11.30	0.18	14.74	9.27	1.56	0.38		0.06	99.94
3	ВП100, »	51.97	0.72	10.70	11.48	0.19	13.13	9.43	1.93	0.36		0.08	99.99
4	303, стекло с.	50.54	0.82	11.91	11.35	0.20	11.25	11.72	2.58	0.09	0.18		100.64
5	» стекло т.	54.20	1.00	16.82	5.97		5.47	10.10	6.48				100.04
6	ВП33, стекло с.	60.33	0.62	20.60	3.18		1.33	7.21	6.26				99.53
7	» стекло т.	58.50	0.50	18.88	5.73		2.84	7.93	4.84				99.22
8	ВП100, стекло	59.77	0.50	19.03	6.74	0.09	0.91	7.67	5.85	0.08			100.64
9	323, »	59.05	0.72	17.46	8.09	0.14	1.86	8.66	3.73	0.35			100.06
10	303, »	84.30		4.58			0.53	0.26	5.81	4.32			99.80
11	» »	85.29		4.89	0.31		0.37	0.24	4.23	4.67			100.00
12	» »	83.84		4.46			0.63	0.31	6.17	4.81			100.22
13	» »	87.92		9.11				1.92		1.79			100.74
14	» »	90.63		8.17						2.73			101.53

Примечание. Ан. 4–9 – микронзондовые определения, ан. 10–14 выполнены на спектрометре “Link ISIS”. Приведены составы светлого (с.) и темного (т.) стекол (см. рис. 2а). Пустые графы соответствуют содержаниям ниже предела чувствительности прибора. В графе FeO приведено суммарное содержание железа.

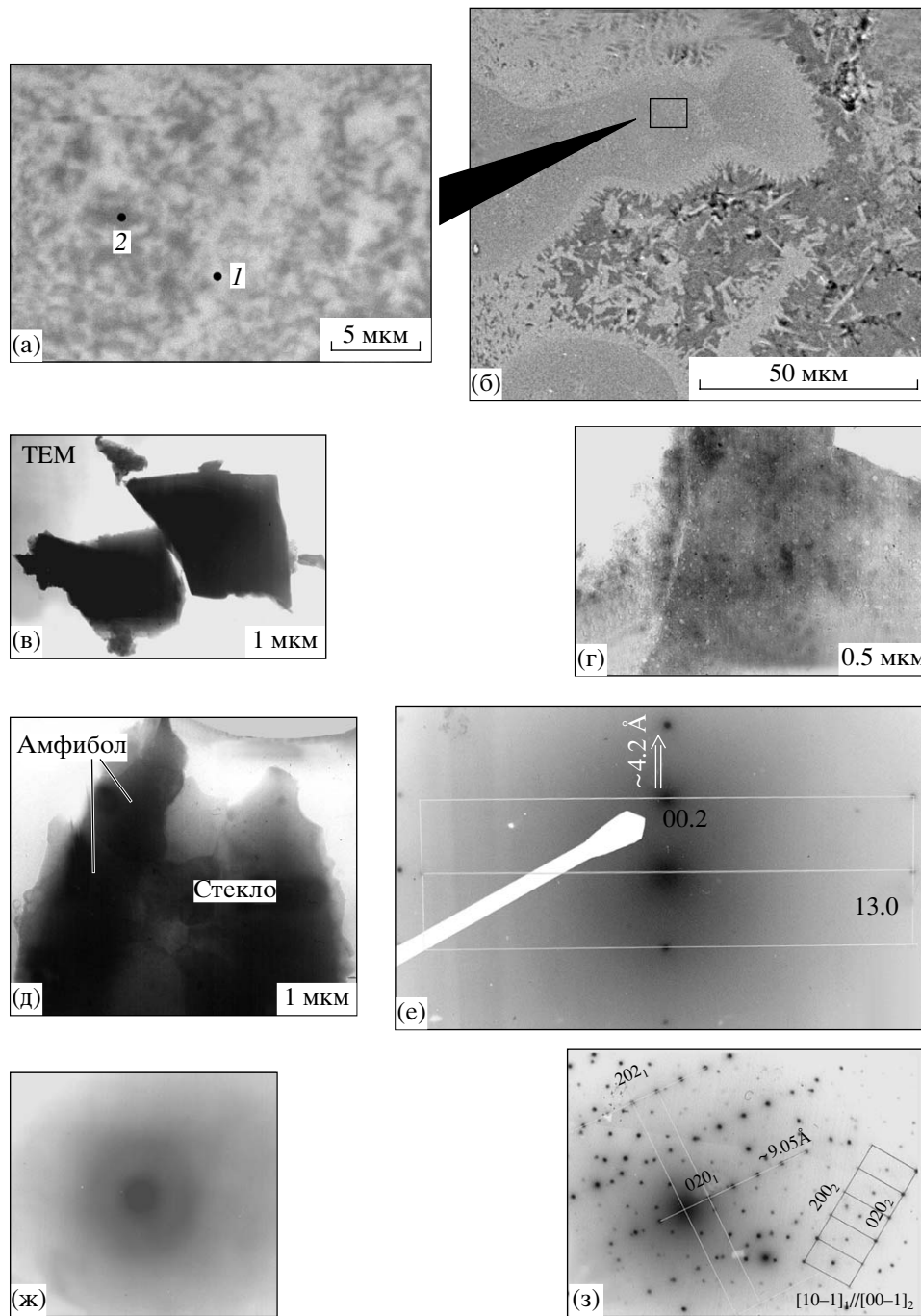
тронметра “Кевех-5100”, на которых соотношение высот пиков Si/K составляло ~4/1. Среди этих частиц стекла изредка встречались аморфные образования SiO<sub>2</sub>, имеющие комковатую форму, относительно более “рыхлое” строение, но содержащее в своем составе Са; 2) аморфные пленочные (или пластинчатые) частицы SiO<sub>2</sub>, в составе которых отмечались лишь следы Al, К и Са. Пластинки обладают мелкопористым (порядка 10 Å) строением, обусловленным тем, что слагаются нанозернами SiO<sub>2</sub> примерно того же размера.

С целью более точного определения состава аморфных фаз SiO<sub>2</sub> приготовленные для изучения в просвечивающем микроскопе суспензионные препараты исследовались в растровом микроскопе, оборудованном спектрометром “Link ISIS”. Полученные данные представлены в табл. 1 (ан. 10–14). Поскольку изображения, получаемые во вторичных электронах растрового микроскопа, отличаются от изображений “на просвет”, между ними нельзя установить точного соответствия. Поэтому представленные составы относятся, по-видимому, к обоим фазам, охарактеризованным выше. Следует учитывать также, что анализ состава производился на тонких фольгах, какими являются препараты для просвечивающего электронного микроскопа, а не на массивных полированных образцах. Поэтому данные о составах были нормализованы, и полученные результаты являются полуколичественными, дающими представление о вариациях химического состава.

Очень часто во всех этих фазах аморфного SiO<sub>2</sub> не наблюдались заметные кольца интенсивности, хотя некоторые из них формировали картины дифракции электронов, на которых фиксировалось широкое диффузное отражение слабой интенсивности, свидетельствующее об определенной степени упорядочения атомов в структуре этих выделений.

Среди этой массы аморфных частиц SiO<sub>2</sub> встречались немногочисленные кристаллические фазы. Как показала дифракционная диагностика, обнаруженные фазы были представлены в основном кристаллами моноклинных амфиболов, состав которых незначительно варьировал от частицы к частице (судя по вариациям высот пиков элементов на спектрах спектрометра “Кевех”). Вместе с тем были зафиксированы отдельные картины дифракции, которые указывали на то, что в образце присутствуют также кристаллы ромбического пироксена (учитывая погасания рефлексов, параметры ячейки этих кристаллов при том же наборе элементов Si, Са, Fe должны быть примерно равны:  $a = 18$ ,  $c = 5.04$ ).

Реже встречались кристаллы эпидота с элементным составом Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>Ca<sub>4.5</sub>Fe<sub>1.5</sub>, где цифры указывают лишь относительную высоту пиков элементов. К редко встречаемым минералам следует отнести и α-кварц. Кристаллы кварца, в составе которых не обнаруживалось элементов-примесей, обычно находятся в тесном срастании с калиевым стеклом, причем граница сопряжения фаз часто имеет округлую форму и резкие очертания.



**Рис. 2.** Вулканическое стекло из базальтов горы Мяндуха (обр. 303). а – изображение стекла в отраженных электронах: 1 – светлое и 2 – темное стекла (составы см. в табл. 1, ан. 4–7); б – общий вид полустекловатого базальта в отраженных электронах; в, г – электронно-микроскопические изображения аморфных выделений  $\text{SiO}_2$  (в – темные частицы стекла, г – плотные агрегаты дисперсных зерен); д – сросток двух произвольно ориентированных кристаллов амфибола, закономерно ориентированных псевдогексагональных зерен тридимита (кристаллы в центре) и кварцевого стекла; е – картина дифракции тридимита; ж, з – картины дифракции кварцевого стекла и амфибола соответственно.

Важно отметить, что в одном случае был найден сросток стекла, амфибола и группы закономерно ориентированных микрокристаллов псевдогексагональной формы высокотемпературного полиморфа  $\text{SiO}_2$  – тридимита (см. рис. 2).

Тридимит является стабильной фазой при температуре между  $867\text{--}1470^\circ\text{C}$  и может метастабильно сохраняться при быстром охлаждении. Обращает на себя внимание и то, что два кристалла амфибола в сростке находятся в произвольной взаимной

ориентации. Очевидно, это свидетельствует о том, что их кристаллизация происходила из разных центров при быстром охлаждении расплава.

Были обнаружены также единичные выделения галита (NaCl) и одного из полиморфов  $TiO_2$  – анатаза, размер кристаллов которых составлял всего несколько нанометров. Оба минерала находятся в виде микровключений в стекле.

Часто встречаются в образце микронных размеров пластинчатые кристаллы слоистых силикатов. Точная фазовая диагностика этих минералов была невозможна из-за того, что не удавалось зарегистрировать от них пространственные рефлексы вдоль оси  $c$ , которые позволили бы однозначно определить параметры кристаллической решетки. Но с учетом элементного состава частиц можно предположить, что эти фазы представлены каолинитом, хлоритом и биотитом. В единичных случаях были обнаружены листоватые кристаллы слоистого силиката состава (Mg, Si, Fe) с параметрами  $a \sim 5.2$ ,  $b \sim 9.0$  и базальным отражением  $d_{002} \sim 9.2 \text{ \AA}$  ( $\times 2 = 18.4$ ), по-видимому, талька.

Кроме того, встречались агрегаты ультратонких кристаллов, в составе которых фиксировались алюминий и Cu. Эти выделения формируют кольцевые картины дифракции, соответствующие кубической структуре с параметром  $a \sim 4.28 \text{ \AA}$ . По-видимому, данная фаза является Al-содержащим купритом ( $Cu_2O$ ), а не самостоятельной Al-фазой.

Таким образом, проведенное нами исследование впервые позволило установить, что в раннепалеопротерозойских лавах КВМС действительно содержится вулканическое стекло. Это стекло состоит из аморфного кремнезема (с примесью K и редко Ca) с мельчайшими выделениями (микронными и нанокристаллами) амфиболов, тридимита,  $\alpha$ -кварца, ортопироксена, эпидота, слоистых силикатов, в том числе и талька, а также галита, анатаза и куприта. Эти фазы неравномерно распределены в стекле, обеспечивая его пятнистый облик и разный химический состав в разных участках. Обращает на себя внимание, что состав этих фаз резко отличается от состава макрокристаллов в тех же лавах, представленных в основ-

ном оливином, высокоглиноземистыми пироксенами, хромитом и плагиоклазом. Более того, установлено, что среди таких микро(нано)кристаллов преобладают водосодержащие фазы (амфиболы и слоистые силикаты), которые иногда находятся в сростках с высокотемпературными метастабильными фазами типа тридимита, что может указывать на их первичную природу, не связанную с процессами девитрификации стекла.

Эти микровключения неравномерно распределены в вулканическом стекле, по-видимому обеспечивая его пятнистую окраску и заметные различия в составе в пределах одного образца. Они не приурочены к каким-либо преимущественным направлениям, из чего следует, что их распределение не было связано с вторичными процессами, а скорее отражает структуру первичной неоднородности расплава, сохранившуюся вследствие его быстрого затвердевания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 01–05–64673 и 00–05–64673).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов В.С. В кн.: Коматииты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита. Л.: Наука, 1988. С. 20–88.
2. Puchtel I.S., Haase K.M., Hofmann A.W. et al. // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1997. V. 61. № 6. P. 1205–1222.
3. Puchtel I.S., Brugamann G.E., Hofmann A.W. et al. // *Contribs Mineral. and Petrol.* 2001. V. 140. P. 588–599.
4. Золотых Е.Б. В кн.: Петрография на рубеже XXI века: Итоги и перспективы. Сыктывкар, 2000. Т. 1. С. 87–90.
5. Золотых Е.Б., Ладыгин В.М. В кн.: Палеовулканология, вулканогенно-осадочный литогенез и рудообразование докембрия. Петрозаводск, 2001. С. 143–144.
6. Шарков Е.В., Смолькин В.Ф., Красивская И.С. // *Петрология.* 1997. Т. 5. № 5. С. 503–522.
7. Шарков Е.В., Богатилов О.А., Красивская И.С. // *Геотектоника.* 2000. № 2. С. 3–25.
8. Шарков Е.В., Синдеев А.С. // *Геохимия.* 1987. № 12. С. 1731–1739.