

УДК 552.64

© Д. чл. Г.Т. СКУБЛОВ*, поч. чл. Ю.Б. МАРИН**, В.М. СЕМИКОЛЕННЫХ,
д. чл. С.Г. СКУБЛОВ***, Ю.Н. ТАРАСЕНКО**

ВОЛХОВИТЫ - НОВЫЙ ТИП ТЕКТИТОПОДОБНЫХ СТЕКОЛ

G.T. SKUBLOV, Yu.B. MARIN, V.M. SEMIKOLENNYKH, S.G. SKUBLOV, Yu.N. TARASENKO
VOLKHOVITES - A NEW TYPE OF TEKTITE-LIKE GLASSES

* e-mail: skublov@land.ru

** Санкт-Петербургский государственный горный институт, 199026, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2;
e-mail: marin@mineral.ras.spb.ru

*** Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

Volkhovites are the tektite-like glasses of mafic and ultramafic composition; for the first time we have discovered them among fluvial-glacial sediments of Valday glaciations (10-65 thousand years) at the right side of the river Volkhov (59°27'N, 32°01'E). Volkhovite particles are characterized by small size (0.1-3.0 mm), varied microtektite aerodynamic (spherules, drop-shaped, dumbbell-like) and irregular forms, and the perfect safety indicating their postglacial age. Single or rare volkhovite grains (up to 20 pieces per 1 kg of loam) were detected at the area 1.0 X 1.5 km; some samples, from an area 20 X 30 m, have shown the anomalous concentrations - up to 1700 grains per 1 kg of loam. Together, in association with volkhovites, there were found some thin metal spherules (titanium-ferrous, iron, copper-gold), various form clastic grains of frothed glasses and slags, fragments of minerals from rocks of Precambrian and Paleozoic basement. The suggested cryptomagmatic model assumes that formation of glasses and slags had taken place in the pre-Holocene period, but volkhovites were formed later, in the post-glacial time, as a result of outburst of the fluidite slag-stone-melt-mud-gas mixture from the asthenosphere up to surface. Meanwhile, drops of the melt have immediately solidified in the air as those tektite-like glasses, and the erupted tuffsite-like mixture intermixed with the fluvio-glacial loams.

Среди многочисленных типов природных стекол (обсидианы, трахилиты, фульгуриты, тектиты, импактные или тектитоподобные стекла) наиболее детально изучены тектиты [O'Keefe, 1976, 1994; Импактиты, 1981; Koeberl, 1986, 1994; Фельдман, 1990; Barnes, 1990; Scholze, 1990; Vogel, 1992; Маракушев и др., 1993; Bouska et al., 1993; Povenmire, 1997; Heinen, 1998; Heide et al., 2001, 2003], представляющие собой небольшие по размерам тела однородного состава с характерными аэродинамическими формами (spherule, pear, teardrop, dumbbell). Для трех полей рассеяния тектитов (бедиазиты и джорджианиты в Северной Америке, молдавиты в Центральной Европе, айвориты в Западной Африке) установлены метеоритные источники вещества тектитов. Для австрало-азиатских тектитов (индошиниты, австралиты, жаманшиниты, иргизиты и др.) наличие таких кратеров только предполагается. По химическому составу тектиты близки к обсидианам, содержание SiO₂ в них редко опускается ниже 60 %, обычно составляя 70-75 %. В ряде случаев отмечается повышенное содержание Cr, Ni, Co, Mg и других, что объясняется заимствованием взвешенного вещества ударника.

Тектитоподобные импактные стекла обнаружены в кратерах Ауеллул (Мавритания), Дарвин и Хенбури (Австралия), Лонар (Индия), Вабар (Саудовская Аравия), Жаманшин (Казахстан). По ряду признаков они заметно отличаются от тектитов, однако четкую границу между ними провести трудно. Особо выделяются ливийские стекла (Северная Африка), занимающие промежуточное положение между тектитами и собственно импактными стеклами [Barrat et al., 1997]. Для тектитоподобных стекол уренгоитов (Западная Сибирь) явно импактного происхождения источник не обнаружен [Deutsch et al., 1997].

Помимо тектитов в группе природных стекол выделяются *микротектиты*, представленные небольшими (обычно менее 2 мм) зернами различных форм, окраски и степени прозрачности, присутствующими в трех из четырех известных полей (кроме Центрально-Европейского) рассеяния тектитов, а также в породах, маркирующих мел-третичную (К/Т) границу. Они играют важную роль в определении границ полей рассеяния тектитов, их стратиграфического возраста и несут информацию о связи тектитов с импактным событием, о местоположении кратера и др. [Montanari, Koeberl, 2000; Marini, 2003]. Последние исследования, в том числе и геохимические, показали, что их нельзя считать просто уменьшенными копиями или обломками тектитов, поскольку они могли появляться в разные фазы импактного процесса. Среди микротектитов по составу резко выделяются «бутылочно-зеленые», отличающиеся повышенным содержанием Mg, Fe и сидерофильных элементов и пониженным - кремнезема и щелочей. В целом состав вещества микротектитов соответствует осадочным породам верхней континентальной коры с незначительной примесью метеоритного вещества [Glass et al., 2004].

Австрало-азиатский тектитовый пояс, выделенный Э.П. Изохом [1997], прослеживается в северо-западном направлении более чем на 10 000 км, от Австралии до кратера Жаманшин, и только в его пределах обнаружены тектиты типа Муонг-Нонг, характеризующиеся псевдофлюидальной текстурой и гигантскими объемами (несколько миллиардов тонн). Ключевым моментом в вопросе соотношения тектитов и импактитов стало обнаружение в кратере Жаманшин тектитоподобных стекол - иргизитов, значительно отличающихся от собственно импактных стекол этого кратера - жаманшинитов [Флоренский, Дабижса, 1980]. Последующие исследования показали близость химического состава тектитоподобных иргизитов и микротектитов кратера Жаманшин с аналогичными стеклами из других регионов [Скублов, Тюгай, 2005а, б; Скублов и др., 2005] и возможность объяснения особенностей их состава многостадийным формированием импактных стекол [Скублов, Тюгай, 2004]. Вопрос о возрасте тектитов кратера Жаманшин до конца не решен. Э.П. Изох [1997] обосновывает юный возраст Жаманшинского кратера - около 10 000 лет; П.В. Флоренский [Флоренский, Дабижса, 1980] доказывает более древний возраст (750 000 лет) кислых разновидностей стекол.

Вопрос происхождения тектитов и микротектитов до сих пор является предметом научных дискуссий. Существует точка зрения, что тектиты представляют собой продукты внеземного вулканизма, тем или иным способом доставленные на Землю [O'Keefe, 1976, 1994; Изох, 1997]. По данным других исследователей, особенности состава и структуры тектитов исключают их вулканическое происхождение и определяются космическими коллизиями на поверхности Земли [Koeberl, 1986, 1994; Heide et al., 2001]. Сравнение между собой импактных стекол и тектитов позволяет сделать вывод, что они значительно отличаются друг от друга, хотя и могли образовываться в результате единого процесса. Каждое импактное событие приводит к образованию импактных стекол, но довольно редко - к появлению тектитов. Поэтому можно предполагать или особые условия происхождения тектитов, или их немедленное разрушение после образования [Heinen, 1998].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу наших исследований было положено предположение о том, что Австрало-Азиатский тектитовый пояс может продолжаться от кратера Жаманшин далее на северо-запад. Если продолжить эту линию, то она окажется в Финском заливе Балтийского моря. В его окрестностях известно множество метеоритных кратеров (Финляндия - 13, Швеция - 6, Эстония - 5, Россия - 2). Некоторые из них имеют молодой возраст - менее 50 000 лет. Это вселяло надежду на возможность обнаружения в европейской части России метеоритных кратеров «жаманшинского» возраста (около 10 000 лет). Она подкреплялась обнаружением голоценовых микротектитов в пределах Кольского полуострова [Нечаева, 1982] и спорадическими находками металлических сферул и микротектитов при шлиховом опробовании (данные В.А. Бурневской, Е.А. Глазова, А.П. Казака, М.С. Лейкума, М.Н. Мурашко и др. – [Панова и др., 2004]). Второе не менее важное положение при поисках тектитоподобных стекол - поиск объектов *in situ*, т.е. неподвижных, поэтому предпочтение всегда отдавалось камовым и озовым грядам по сравнению с флювиогляциальными равнинами; меньшее внимание уделялось аллювиальным и озерным отложениям. При этом всегда детально анализировались космофотогеологические данные (снимки Landsat) и опубликованные геологические карты масштаба 1 : 200 000.

Полевые работы. Отбирались пробы рыхлых четвертичных отложений весом 1-2 кг каждая. Это количество оказалось достаточным для статистически достоверных выводов о составе суглинков, супесей, лессов (1 кг) и гравийных песков, валунных суглинков (2 кг). Особое внимание уделялось изучению карьеров глин, песков, гравия, валунов а также естественных обнажений, обрывов и искусственных выработок (закопушки, шурфы, неглубокие скважины ручного бурения). Всего было отобрано около 1000 проб (2004 г. - 100, 2005 г. - 700, 2006 г. - 200). В результате этих исследований в пределах южной части Карелии, Ленинградской, Псковской и Новгородской областей выявлено более 20 ареалов развития микротектитов, в которых отмечались одна или несколько проб с низкими содержаниями стекол (обычно 5-20 зерен на 1 кг пробы), а также три участка развития природных шлаков. Наиболее интересной оказалась находка в г. Кириши. В 2005 г. В.М. Семиколенных при изучении суглинков обратил внимание на блески редких мельчайших золотинок в рыхлых отложениях правобережья р. Волхов. Проведенное им совместно с Ю.Н. Тарасенко опробование привело к обнаружению разнообразных микротектитов. Сотрудники ВСЕГЕИ А.П. Казак и М.Н. Афанасов подтвердили их принадлежность к микротектитам и обратили внимание на удивительное сходство с микроиргизитами из коллекции Г.Т. Скублова. В 2006 г. авторы статьи провели несколько совместных маршрутов, которые позволили уточнить геологическую позицию тектитоподобных стекол и установить их тесную связь с другими стеклами и шлаками.

Обработка проб. На первом этапе исследований весной 2006 г. проводилось систематическое опробование ареала развития волховитов. Среди более 20 отобранных и рассмотренных под биноклем проб песчаных суглинков была выделена одна (пр. 2012) с максимальным количеством зерен волховитов. Вес ее составлял 1590 г. Обработка проводилась ручным способом, чтобы не повредить зерна волховитов. Проба заливалась водой и выдерживалась 1 сутки до максимального разбухания глинистого материала. Отделение глинисто-алевритовых частиц осуществлялось в слабо проточной воде, при этом проба была разделена на существенно гравийно-песчанистую (вес 605 г) и глинисто-алевритовую (985 г) фракции, высушенные на водяной бане для последующих исследований.

Далее песчанистая фракция с помощью стандартных сит разделялась на: 1 - грубозернистую (менее 10 меш; размеры зерен: минимальный по короткой оси - 1 мм, средний - 3 мм, максимальный по длинной оси - 6 мм); 2 - крупнозернистую (10-20 меш; соответствующие размеры 0.7-1.3-3 мм); 3 - среднезернистую (20-40 меш; размеры 0.4-0.7-1.5 мм соответственно); 4 - мелкозернистую (40-60 меш; размеры 0.2-0.4-0.8 мм); 5 -

тонкозернистую (менее 60 меш; размеры 0.1-0.2-0.5 мм) фракции. Их взвешивание показало (1 - 93 г, 2 - 109, 3 - 138, 4 - 99,5 - 166 г), что песчаная фракция в суглинках практически не отсортирована флювиогляциальными процессами. Выборочный подсчет количества зерен во фракциях и их взвешивание позволили определить средний вес одного зерна в каждой фракции: 1 - 40 мг, 2 - 3, 3 - 0.5, 4 - 0.1, 5 - 0.01 мг. Нетрудно подсчитать количество зерен в пробе 2012 по каждой фракции: 1 - 2325, 2 - 36 333, 3 - 276 000, 4 - 990 000, 5 - 166 000 000, которое вполне достаточно для поиска микротектитов. С помощью ручного магнита МРМ-1 и стальной иглы каждая фракция пробы разделялась на магнитную, сильноэлектромагнитную (ЭМ-1), слабоэлектромагнитную (ЭМ-2) и немагнитную фракции и под бинокляром подсчитывалось количество зерен в каждой фракции. Анализ полученных результатов (табл. 1) показал, что содержание волховитов в суглинке пробы 2012 составляет около 1700 зерен на 1 кг. Подавляющая их часть приходится на три фракции: крупно-, средне-, мелкозернистую со средними размерами 1.3-0.7-0.4 мм, т.е. средний размер зерен волховитов составляет 0.7 мм. Минимальное количество зерен волховитов обнаружено в магнитной (3), низкое - в немагнитной (9) и сильноэлектромагнитной (8), высокое - в слабоэлектромагнитной (80 %) фракциях. В слабоэлектромагнитной песчанистой среднезернистой фракции обнаружено 3300 зерен, из которых 769 приходится на волховиты, что дает максимальный процент (23 %) доли волховитов.

Для дальнейших исследований были выбраны 1000 зерен волховитов, с учетом их распространенности по размеру и магнитности. Далее зерна разделялись по цвету и форме, в результате чего была установлена тесная связь между формой зерен и их цветом: от черных волховитов к медовым и зеленым наблюдается смена изометричных форм на сильно вытянутые и неправильные. Слабее эта тенденция выражена для волховитов бурого цвета и зерен слабовытянутой формы. Затем, с учетом разделения волховитов по размеру, магнитности, цвету, форме, была отобрана представительная выборка для изготовления прозрачно-полированных шлифов и последующего микроскопического анализа. Для исследования отбирались также обломки шлаков, стекол без признаков аэродинамических форм, зерна различных минералов, металлические сферулы. При этом соблюдались пропорции: волховиты - около 50 %, стекла и шлаки - 20, минералы - 20, металлические сферулы - около 10 %. Было изготовлено три шлифа, содержащие крупные ($N= 93$), средние (182) и мелкие (213) зерна. Просмотр шлифов в проходящем и отраженном свете показал, что все зерна волховитов являются прозрачными или полупрозрачными и что их удобно делить на три большие группы: медовые; зеленые с переходами до светло-зеленых и черно-зеленых; бурые, с переходами до кирпично-красных, шоколадных и черных. Впервые удалось наблюдать включения металлических сферул, реже минералов и различных минералов внутри зерен волховитов. Наибольшее количество их было обнаружено в волховитах зеленого цвета.

После завершения микроскопических исследований и предварительной классификации волховитов и ассоциирующихся с ними стекол, шлаков, металлических сферул возникла необходимость дополнительного отбора зерен волховитов медового цвета, зеленых волховитов с включениями, различных шлаков, металлических сферул и минералов для более детальных исследований. Летом 2006 г. была отобрана проба суглинков весом 5 кг (пр. 2035), которая была обработана по описанной выше схеме. Были подготовлены еще три стеклянные пластинки крупных, средних и мелких зерен различного состава в количестве 71, 154 и 147 штук соответственно, а из них приготовлены прозрачно-полированные шлифы. Кроме того, была сделана демонстрационная стеклянная пластинка с волховитами (рис. 1).

Аналитические работы. Для микроскопического изучения из 860 зерен волховитов, стекол, шлаков, сферул и минералов, наклеенных на 6 пластинок, было выбрано 182 зерна, для большинства из которых сделано по 1-2 силикатных анализа. Для наиболее интересных зерен выполнено по 3-5, до 17 анализов на одно зерно. Всего было сделано

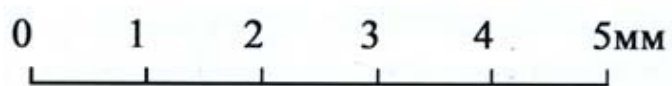


Рис. 1. Зерна волховитов различного цвета и формы.

Fig. 1. Volkhovite grains of different shapes and colors.

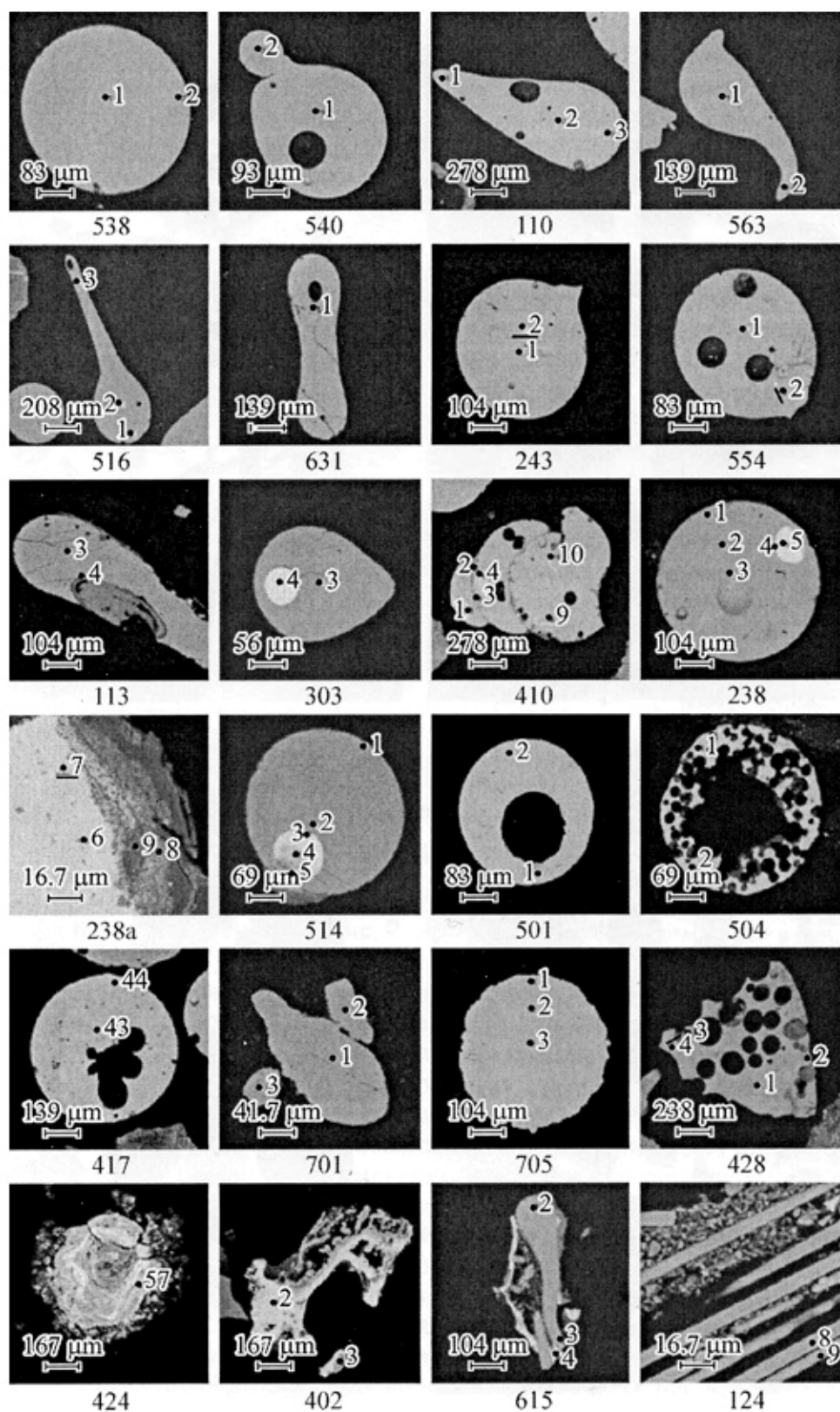


Рис. 2. Микрофотографии волховитов, сферул, стекол и шлаков в отраженных электронах.

Волховиты: магниевые (пр. 538, 540), кальциевые (110, 563), марганцевые (516, 631); *включения в волховитах:* магниевых (пр. 243), кальциевых (554), марганцевых — кальцитовая миндалина (пр. 113), нелопнувшая сферула (303), высокохромистые включения (410), взорвавшиеся сферулы (пр. 238; 514); *сферулы металлические:* железистые (пр. 501), титан-железистые (504, 417), медно-золотые (701, 705); *стекла силикатные вспененные* (пр. 428); *шлаки* (пр. 424, 402); *включения в Fe-тексите* (пр. 615) и в шунгитоподобном образовании (пр. 124).

Fig. 2. Microphotographs of volkhovites, spherules, glasses and slag particles; back-scattered electron images.

373 анализа. Исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе модели АВТ-55, оснащенный микрозондовой системой Link-AN-10000 (аналитик М.Д. Толкачев, ИГГД РАН). Каждое зерно фотографировалось в отраженных электронах (рис. 2), и на нем маркировалась точка силикатного анализа. В связи со спецификой работы на данном приборе (угольное напыление на шайбах для микрозондовых исследований, невозможность определения углерода и кислорода) и спецификой изучаемого объекта (присутствие зерен шунгитоподобных образований, одновременное изучение металлических и силикатных фаз; наличие проб с суммой значительно выше/ниже 100 %) нами были приняты некоторые условные допущения.

Таблица 1

Характер распределения зерен волховитов в песчанистой фракции суглинков пробы № 2012

Distribution of volkhovite grains in the sandy fraction of sandy-loam from sample N 2012

№	Размер, меш	Тип	Фракция								Всего	
			магнитная		ЭМ-1		ЭМ-2		немагнитная		N	P
			<i>N</i> ₁	<i>P</i> ₁	<i>N</i> ₂	<i>P</i> ₂	<i>N</i> ₃	<i>P</i> ₃	<i>N</i> ₄	<i>P</i> ₄		
1	>10	ФР	6	0.26	10	0.43	13	0.56	2296	98.25	2325	100
2	10—20	ФР	26	0.01	80	0.22	400	1.10	35827	98.61	36333	100
3		ВЛ	4	0.01	11	0.03	49	0.13	12	0.03	76	0.21
4	20—40	ФР	130	0.05	750	0.27	3300	1.20	271805	98.48	276000	100
5		ВЛ	14	0.005	50	0.02	769	0.28	52	0.02	885	0.32
6	40—60	ФР	297	0.03	2376	0.24	9504	0.96	978120	98.80	990000	100
7		ВЛ	24	0.002	80	0.008	940	0.09	130	0.013	1174	0.12
8	Менее	ФР	16600	0.01	199200	0.12	1112200	0.67	164672000	99.20	166000000	100
9	60	ВЛ	40	0.00002	70	0.00004	400	0.0002	50	0.00003	560	0.0003
Итого		ВЛ	82	3	211	8	2158	80	244	9	2695	100

Примечание. *N_i* — количество зерен во фракции; *N* — суммарное количество зерен; *P_i* — процентное содержание зерен в изучаемой гранулометрической фракции; ФР — вся фракция; ВЛ — волховиты. Различным шрифтом выделены данные, полученные при изучении фракции под бинокляром (*полужирный*), при взвешивании и дальнейшем расчете (*курсив*), при расчетах (*светлый шрифт*). Во фракции более 10 меш волховиты не обнаружены.

Во-первых, были проанализированы данные 9 проб, в которых сумма оксидов превышала 110%. В одной пробе (212.19) установлены содержания FeO 63.5 %, SiO₂ 66.2, TiO₂ 16.9, Al₂O₃ 3.5, Cr₂O₃ 0.9 и менее 1 % остальных оксидов (сумма 152.8 %), что свидетельствует о резко восстановительных условиях образования сферулы. Возможность присутствия в ней силицидов железа, титана, алюминия, хрома нами не изучалась, и проба не включалась в сводную выборку для статистической обработки. В 8 оставшихся анализах сумма оксидов составляла 113-120 %; это железистые или силикатно-железистые включения в различных типах волховитов; по-видимому, в них в ограниченном количестве присутствуют силициды металлов; эти анализы не использовались при дальнейшей статистической обработке. Во-вторых, исключались из объектов статистической обработки результаты с суммой содержаний оксидов до 10 (стеклоуглерод, шунгит?), около 60 (карбонаты), 70-90 % (насыщенные углеродом? шлаки); при сумме более 90 % анализы включались в статистическую выборку. В-третьих, при исследовании металлических сферул и некоторых шлаков с очень высоким содержанием железа (более 80 %) расчет концентраций производился по бескислородной модели; вместе с тем анализы силикатно-железистых шлаков нередко удовлетворительнее рассчитывались по кислородной модели. Поэтому с целью стандартизации все результаты

анализов с помощью переводных коэффициентов были пересчитаны на кислородную модель, а суммы содержаний оксидов приведены к 100 %. Именно эти данные и использовались при статистических расчетах.

Статистические методы обработки данных. Результаты анализов, приведенные к 100 %, были сгруппированы в базу данных, в которой для каждой пробы в закодированном виде была дана геологическая информация о размере зерен, магнитности, цвете, форме и возможной геологической принадлежности. Широко использовались различные статистические методы [Дэвис, 1990], в том числе и факторный анализ [Белонин и др., 1982]; особенности их применения обсуждались нами ранее [Марин и др., 1983; Скублов, Тюгай, 2004].

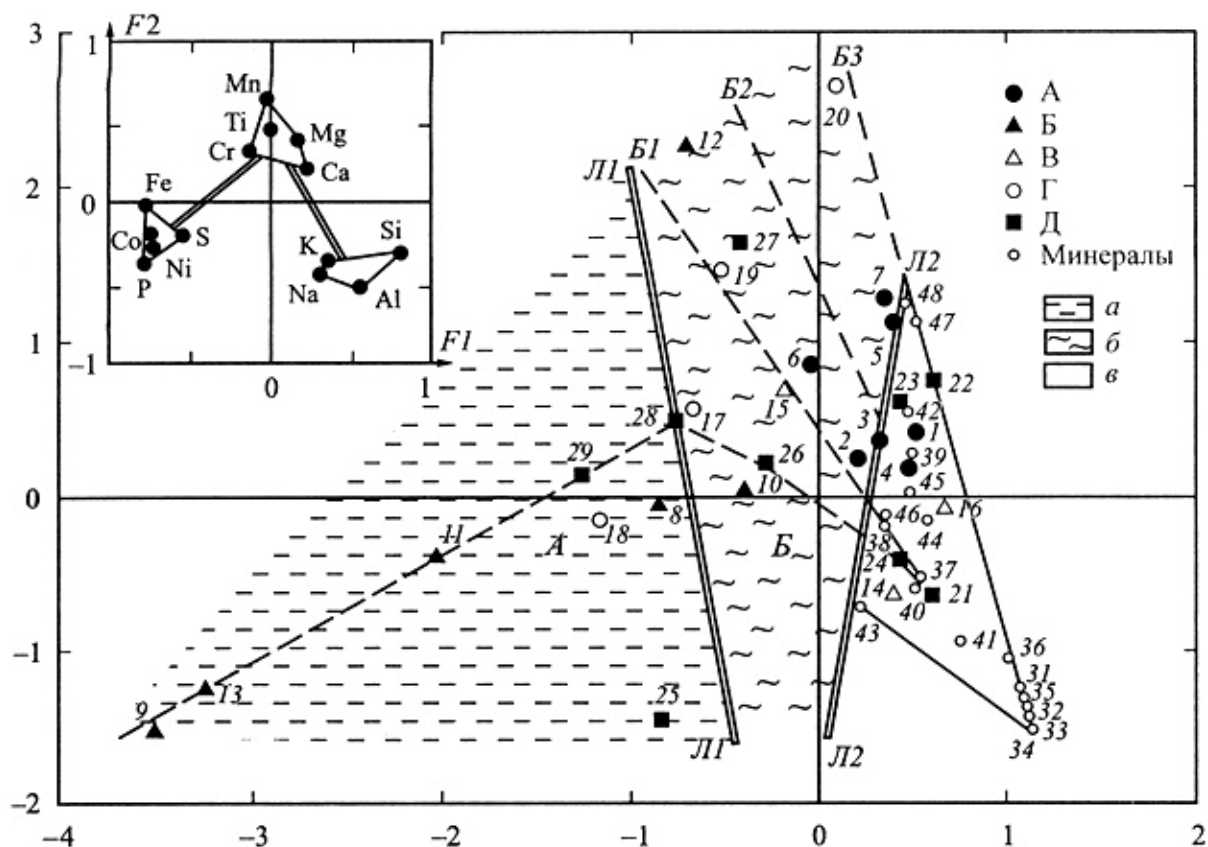


Рис. 3. Петрохимическая модель формирования волховитов, основанная на результатах обработки методом главных компонент матрицы средних содержаний петрогенных оксидов в объединенной выборке, включающей волховиты, ассоциирующие с ними сферулы, стекла и шлаки (табл. 2, 1—29), а также минералы (31—48: полевые шпаты — 31—36; биотит — 37; роговые обманки — 38, 39; глауконит — 40; хлорит — 41; хромдиопсид — 42; гранаты — 43—46; серпентины — 47, 48).

Слева сверху — диаграмма факторных нагрузок для первого ($F1$) и второго ($F2$) факторов; веса факторов 27 и 13 % соответственно. Справа снизу — диаграмма значений факторов $F1$ и $F2$ для 47 совокупностей. a — ареалы распространения совокупностей ассоциаций P, Ni, Co, Fe, S; b — ареалы совокупностей ассоциации Cr, Ti, Mn, Mg, Ca; c — ареалы совокупностей ассоциации K, Si, Na, Al; Л1 и Л2 — линии, разграничивающие ассоциации; B1, B2, B3 — линии петрохимических трендов; А—Д — группы в табл. 2.

Fig. 3. Petrochemical model of volkhovites formation, based on the treatment by the principal components method of matrix data on the average contents of petrogenic oxides in volkhovites and associating them spherules, glasses and slag particles.

О классификации стекол и шлаков. Наиболее трудными оказались вопросы классификации волховитов и ассоциирующих с ними стекол и шлаков. Если обратиться к конечному результату исследований (табл. 2), то можно видеть достаточно подробную классификацию, основанную на геологических, петрографических и петрохимических

Таблица 2

Статистические параметры распределения оксидов в главнейших типах волховитов, стекол и шлаков Киришской структуры
 Statistical parameters of distribution of petrogenic oxides in the main types of volkhovites, glasses and slag particles of Kirishi structure

Номер совок.	Число проб	Группа	Тип	Под-тип	SiO ₂		TiO ₂		Al ₂ O ₃		FeO		MnO	
					x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
1	12	А. Силикатные стекла — волховиты	А1. Магниси́вые волховиты	1	38.96	0.43	0.88	0.13	11.62	0.21	0.61	0.10	0.70	0.06
2	13			2	39.24	0.43	0.98	0.09	11.90	0.27	0.66	0.20	0.66	0.08
3	26			1	36.56	0.84	0.67	0.14	10.73	0.42	1.07	0.43	2.33	0.16
4	5	А2. Кальци́стые волховиты	А2. Кальци́стые волховиты	2	40.69	1.07	0.86	0.68	10.18	1.07	3.73	1.92	0.72	1.39
5	69			1	49.87	1.50	0.35	0.07	4.93	0.21	9.66	0.98	12.06	0.53
6	13			2	49.64	1.17	0.35	0.07	5.00	0.21	9.85	0.38	11.83	0.56
7	1	Б. Включения в волховитах	Б1. Магниси́вых Б2. Кальци́стых Б3. Марганце́вых	3	49.55		0.56		2.71		10.18		13.15	
8	2			1	17.66	3.80	0.27	0.21	6.21	0.91	52.83	9.77	0.19	0.11
9	2			1	1.37	1.05	—	—	0.19	0.10	91.90	2.60	0.12	0.16
10	8	В. Включения в других новообразованиях	В1. В Fe, Ti-сферах В2. В Fe-тектите В3. В стеклоуглероде	2	38.32	11.16	0.67	0.23	8.38	1.93	30.77	8.22	4.20	3.54
11	5			1	1.21	0.16	0.04	0.04	0.03	0.05	93.46	2.47	0.28	0.20
12	8			3	0.89	0.23	0.22	0.25	3.49	2.13	19.14	13.21	8.35	1.87
13	10	Г. Сферы металлические	Г1. Железистые Г2. Титан-железистые	3	2.43	2.07	0.08	0.10	0.14	0.15	72.78	19.99	1.85	2.62
14	3			1	55.67	18.06	1.63	1.54	20.41	6.19	8.99	9.05	0.26	0.21
15	1			1	53.44		0.32		4.96		9.00		11.70	
16	2	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные всепенные Д2. Шлаки железисто-силикатные Д3. Шлаки силикатно-железистые Д4. Шлаки железистые	1	57.53	0.31	0.02	0.03	16.08	0.08	0.18	0.10	0.04	0.01
17	13			1	0.44	0.41	0.38	0.76	0.12	0.09	97.78	1.20	0.49	0.37
18	2			2	2.84	0.62	—	—	—	—	92.19	2.20	0.36	0.08
19	8	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные всепенные Д2. Шлаки железисто-силикатные Д3. Шлаки силикатно-железистые Д4. Шлаки железистые	1	11.33	13.58	21.35	13.65	1.77	0.84	56.86	12.74	6.39	5.15
20	2			2	16.73	0.41	43.50	0.09	7.67	0.28	10.04	0.23	12.08	0.17
21	9			1	56.41	6.92	1.14	0.48	22.85	3.74	8.80	4.15	0.07	0.06
22	2	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные всепенные Д2. Шлаки железисто-силикатные Д3. Шлаки силикатно-железистые Д4. Шлаки железистые	3	56.28	3.46	0.67	0.31	13.73	1.51	5.88	1.17	15.88	1.97
23	2			3	47.90	4.67	0.51	0.16	8.05	4.23	5.80	5.15	5.94	8.18
24	5			1	40.49	5.37	0.69	0.51	17.50	2.46	31.58	4.73	0.40	0.32
25	1	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные всепенные Д2. Шлаки железисто-силикатные Д3. Шлаки силикатно-железистые Д4. Шлаки железистые	2	35.94		0.56		19.90		30.63		0.21	1.07
26	8			1	17.05	18.00	0.51	0.84	6.99	5.67	70.02	25.48	0.83	1.07
27	1			2	10.73		7.28		3.05		62.03		15.00	
28	28	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные всепенные Д2. Шлаки железисто-силикатные Д3. Шлаки силикатно-железистые Д4. Шлаки железистые	1	1.51	1.44	0.08	0.26	0.17	0.26	97.14	1.97	0.30	0.25
29	2			2	2.02	1.98	0.01	0.02	—	—	96.44	1.97	0.34	0.17

Таблица 2 (продолжение)

Номер совок.	Число проб	Группа	Тип	Под-тип	SO ₃		Cr ₂ O ₃		NiO		CoO		Cl ₂ O	
					x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
1	12	А. Силикатные стекла — волховиты	А1. Магнисевые волховиты	1	0.998	0.474	0.054	0.052	—	—	—	—	—	—
2	13			2	1.148	0.093	0.029	0.035	0.046	0.047	0.041	0.031	0.007	0.013
3	26			1	2.449	0.569	0.027	0.041	—	—	—	0.008	0.023	0.008
4	5	А2. Кальциевые волховиты	А2. Кальциевые волховиты	2	0.563	0.413	0.075	0.134	—	—	—	—	—	—
5	69			1	0.198	0.175	1.024	0.127	—	—	—	—	0.007	0.016
6	13			2	0.222	0.139	0.991	0.104	0.044	0.035	0.073	0.065	0.005	0.008
7	1	Б. Включения в волховитах	Б1. Магнисевых	3	0.497	—	1.134	—	—	—	—	—	—	—
8	2			1	1.166	0.038	0.020	0.026	0.060	0.037	0.052	0.014	0.013	0.017
9	2			1	0.657	0.141	0.052	0.014	0.505	0.712	0.184	0.258	0.010	0.011
10	8	Б3. Марганцевых	Б3. Марганцевых	2	0.128	0.116	4.035	6.106	0.068	0.058	0.069	0.114	0.138	
11	5			1	1.489	1.031	1.181	0.571	0.102	0.117	0.140	0.270	0.007	0.012
12	8			3	0.018	0.016	54.900	13.674	0.058	0.138	0.032	0.065	0.016	0.019
13	10	В. Включения в других новообразованиях	В1. В Fe, Ti-сферах	3	9.529	15.118	5.765	4.506	0.243	0.113	0.183	0.013	0.019	
14	3			1	0.390	0.645	0.034	0.039	—	—	0.045	0.074	0.164	0.165
15	1			1	0.277	—	0.769	—	—	—	0.128	—	0.058	—
16	2	В2. В Fe-текстуре	В2. В Fe-текстуре	1	0.105	0.147	0.035	0.048	—	—	—	—	0.062	0.009
17	13			1	—	—	0.069	0.054	—	—	—	—	—	—
18	2			2	1.299	0.284	0.117	0.070	—	—	0.085	0.067	0.179	0.083
19	8	Г. Сферы металлические	Г1. Железистые	1	—	—	0.225	0.186	0.046	0.030	0.074	0.018	0.032	
20	2			1	—	—	0.137	0.023	—	—	—	—	—	—
21	9			2	0.017	0.023	0.137	0.023	0.047	0.033	0.007	0.019	—	—
22	2	Д. Стекла и шлаки силикатно-железистые	Д1. Стекла силикатные вспененные	1	0.020	0.032	0.043	0.047	0.012	0.033	—	—	—	—
23	2			3	0.095	0.059	—	—	—	—	—	—	—	—
24	5			3	0.725	1.023	0.437	0.617	—	—	—	—	—	—
25	1	Д2. Шлаки железисто-силикатные	Д2. Шлаки железисто-силикатные	1	0.118	0.107	0.023	0.030	—	—	—	—	—	—
26	8			2	0.778	—	—	—	0.158	—	0.075	—	0.280	—
27	1			1	0.216	0.407	0.028	0.033	—	—	—	—	—	—
28	28	Д3. Шлаки силикатно-железистые	Д3. Шлаки силикатно-железистые	2	0.009	—	0.033	—	—	—	—	—	—	
29	2			1	0.065	0.172	0.064	0.069	—	—	0.005	0.018	—	—
				2	—	—	0.914	0.019	0.256	0.158	—	—	—	

Примечание. Выделенные подтипы отвечают стандартным (1), нестандартным (2) и аномальным (3) разновидностям совокушностей. Содержания оксидов даны в весовых процентах; х — среднее содержание; s — стандартное отклонение. Знаком (—) указаны средние содержания ниже порога чувствительности микроанализа.

данных. Главнейшими признаками являлись: аэродинамическая форма силикатных стекол - волховитов (группа А); цвет зерен волховитов, от преимущественно медового (Mg-волховиты) к бурому (Ca-волховиты) и зеленому (Mn-волховиты); цвет металлических сферул от стального (Г1) к блестящему черному (Г2) и желтому (медно-золотые сферулы); обломочная форма зерен стекол и шлаков (группа Д), обилие газовой-жидких включений во вспененных блестящих силикатных стеклах (Д1), резкое увеличение степени магнитности шлаков при переходе от железисто-силикатных шлаков (Д2) к железистым (Д4). При петрографических и микрозондовых исследованиях удалось обнаружить включения в волховитах (группа Б) и других новообразованиях (группа В). Более детальная классификация проведена по петрохимическим данным. В ряде случаев различия между типами новообразований настолько существенны (А1-А2-А3), что они прекрасно видны и без статистических критериев; последние лишь подкрепляют сделанные выводы при 0.01-1 % уровнях значимости. Обычно границы между типами, по петрохимическим данным, достаточно резкие (Д1-Д2-Д3), однако могут наблюдаться и постепенные переходы (Д3-Д4). Выделение подтипов стекол и шлаков производилось статистическими методами по петрохимическим данным. Каждый из выделенных типов проверялся на однородность выборки по соответствующим критериям при 5-10 % уровне значимости. Например, по содержаниям Р, Cr, Ni, Со среди различных типов волховитов выделены подтипы со средним (подтипы 1, 3, 5), высоким (подтипы 2, 4, 6) и аномальным (подтип 7) содержанием оксидов. Наиболее резкие петрохимические различия устанавливаются для трех подтипов изометричных включений в Mn-волховитах, что позволило разделить эти сферулы на стандартные, взорвавшиеся и высокохромистые.

При детальном изучении волховитов было обращено внимание на аномально высокие содержания в стеклах СаО (18-42 %), что не характерно для доголоценовых магматитов [*Марин и др., 1983*], и удивительную индивидуальность трех типов волховитов, обогащенных: 1 - Mg, Ti, Al, K; 2 - Ca, Na, SO₃; 3 - Mn, Si, Fe, Cr. На втором этапе, когда данные по волховитам анализировались вместе с петрохимическими данными по включениям, металлическим сферулам, стеклам и шлакам на основе матрицы средних содержаний (табл. 2), был сделан вывод о единой природе этих новообразований. На заключительном этапе исследований факторный анализ объединенной выборки средних содержаний подтипов стекол и шлаков, силикатных минералов и их разновидностей позволил выделить три ассоциации химических элементов: 1 - P, Ni, Co, Fe, S; 2 - Cr, Ti, Mn, Mg, Ca; 3 - K, Si, Na, Al (рис. 3) и высказать предположение, что накопление элементов первой группы происходило в металлосфере (по В.Н. Ларину [*2005*]), второй - в астеносфере; третьей - в литосфере, и что на границе астеносферы и литосферы формировались магматические очаги, продуцировавшие волховиты, а минералообразование происходило только в литосфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геологическое строение района. Район развития волховитов находится в северо-западной части Русской платформы, среди полого залегающих палеозойских осадочных толщ. Непосредственно на участке ниже ледниковых отложений залегают верхнеордовикские доломиты, которые подстилаются среднеордовикскими доломитами и известняками (кегельский, хревицкий, идаверский, кукерский, таллинский горизонты), нижнеордовикскими известняками кундского горизонта, глауконитовыми известняками волховского горизонта, глауконитовыми песками леэтского горизонта, диктионемовыми сланцами, оболочными песками пакерортского горизонта. Мощность ордовикских отложений составляет 170 м. Они подстилаются кембрийскими глинами пиратаской, лонтоваской, ломоносовской свит мощностью 130 м. Ниже залегают верхнепротерозойские глины с прослоями алевритов, песков и гравелитов (котлинский и гдовский горизонты) мощностью около 200 м. Фундаментом платформенных отложений

служат архейские и ниже-среднепротерозойские граниты, гнейсы, кристаллические сланцы и амфиболиты.

Рыхлые озерно-ледниковые и флювиогляциальные отложения, представленные глинами, суглинками, супесями, алевритами и песками, большинство геологов относят к верхнечетвертичному возрасту и связывают их с валдайским оледенением (65 000-10 000 лет назад). По находкам флоры эти отложения параллелизуются с крестецкими слоями верхневалдайского стадияльного горизонта. Мощность их обычно не превышает 30 м. Непосредственно на участке развития волховитов преобладают пестроокрашенные суглинки бурого, серого, реже желтовато-коричневого цвета, иногда с голубовато-зеленоватым оттенком. Количество песчаной фракции в них обычно составляет 7-15 %. Отмечаются редкие хорошо окатанные валуны и галька пород докембрийского кристаллического фундамента.

Волховиты. Главнейшая особенность волховитов - прекрасно выраженные аэродинамические формы (рис. 1, 2), среди которых преобладают изометричные сферулы, широко развиты слабо вытянутые формы (яйцеобразные, гантелевидные, эллипсоидальные), реже встречаются сильно вытянутые и неправильной формы зерна. Волховиты разделяются на три группы: существенно магниевые, кальциевые и марганцевые. Как уже отмечалось, они характеризуются максимальными концентрациями следующих оксидов: 1 - Mg, K, Al, Ti; 2 - Ca, Na, S; 3 - Mn, Cr, Si, Fe. По многим оксидам у них нет полей перекрытия составов.

Среди магниевых волховитов преобладают сферические формы. Для кальциевых стекол преобладание сферических форм не столь заметно, в значительных количествах появляются зерна удлиненной, каплевидной и неправильной формы. Среди марганцевых волховитов - примерно равное количество изометричных, удлиненно-вытянутых и неправильной формы зерен. Размер зерен волховитов увеличивается от магниевых (в среднем - 0.3 мм) к кальциевым (0.4 мм) и марганцевым (0.5 мм) волховитам. Если среди первых крупные зерна встречаются крайне редко, то в марганцевых разностях заметно преобладают крупные и средние по размерам частицы, присутствующие примерно в равных количествах.

Хорошим диагностическим признаком является цвет волховитов. Все зерна магниевых волховитов имеют сочный светлый медовый цвет и почти всегда прозрачны. Кальциевые стекла характеризуются преобладанием бурого цвета, с переходами к черному и коричневому; обычно они непрозрачны под биноклем и нередко слабо пропускают свет в прозрачно-полированном шлифе. Марганцевые волховиты обычно имеют темно-зеленый и черно-зеленый цвета, реже - зеленый и светло-зеленый, в последнем случае они могут быть прозрачными; крайне редко встречаются зерна зеленовато-бурого цвета; в шлифах черные марганцевые волховиты полупрозрачны и имеют отчетливый зеленый оттенок.

При сравнении средних содержаний петрогенных оксидов в трех типах волховитов различия устанавливаются при 0.01-1 % уровне значимости критерия Стьюдента, а абсолютные величины последнего могут достигать значений от 30 до 100. Такие контрастные различия обусловлены крайне низкими величинами дисперсий содержаний оксидов. Например, стандартное отклонение для Al_2O_3 составляет 0.27 у магниевых и 0.21 % у марганцевых стекол (соответствующие средние содержания равны 11.7 и 4.9 %). Это значит, что коэффициент вариации для Al_2O_3 в рассматриваемых стеклах составляет всего лишь 2-4 %. Однако при включении в выборку всех типов волховитов статистики резко меняются (среднее - 7.4 %, стандартное отклонение - 3.1 %), а коэффициент вариации для Al_2O_3 увеличивается до 42 %.

С целью изучения внутризерновой изменчивости состава волховитов в 20 зернах были проанализированы центральные и периферические их части. Значимых различий не установлено. Только в одном случае (пр. 516) выявлено увеличение содержаний Si, Al в удлиненном отростке каплевидного зерна. Таким образом, для волховитов

устанавливаются сильные различия между тремя группами стекол, слабые различия зерен внутри группы и полное отсутствие различий между частями зерен. Следует особо подчеркнуть, что по четырем элементам (P, Ni, Co, Cl) статистически значимые различия между тремя группами стекол не устанавливаются, однако при компонентном анализе петрохимических данных внутри каждой выборки по второму фактору происходит разделение проб на два подтипа, которые условно можно назвать «стандартными» и «нестандартными». Список этих элементов, выявленных с помощью критерия Стьюдента, оказался несколько различным для трех групп: магниево-вольфрамовые - (+ Co, Ni, Al, Ti, P; - Ca, K); кальциевые - (+ Si, K, Fe, P; - Ca, Mn, S, Na); марганцевые - (+ Ni, Co, P), где знаком + показана тенденция накопления элемента в «нестандартном» вольфрамовите. Таким образом, главнейшими элементами-индикаторами «нестандартности» стекол являются (+ P, Ni, Co; - Ca). Результаты корреляционного и факторного анализов составов вольфрамовитов подтверждают сделанные выводы. Если в выборку включать стекла всех типов, то на факторной диаграмме резко обособляются три типа вольфрамовитов. При рассмотрении каждого типа отдельно происходит разделение «стандартных» и «нестандартных» стекол. При статистической обработке данных раздельно по каждому подтипу получается изотропная диаграмма значений факторов.

Включения в вольфрамовитах. Во многих зернах вольфрамовитов при микронном исследовании обнаруживаются включения, размер которых увеличивается от магниево-вольфрамовых (0.006 мм) к кальциевым (0.01) и марганцевым (0.14 мм). В этом же направлении закономерно увеличивается количество зерен с включениями (3-5-30 % соответственно). Если в магниево-вольфрамовых и кальциевых вольфрамовитах все включения однотипны, то в марганцевых выделяются миндалины кальцита, окруженные силикатной оболочкой, гирлянды слипшихся зерен с сохранившейся силикатной оболочкой между ними и высокохромистыми включениями, нелопнувшие и взорвавшиеся сферулы.

Резкие различия включений между собой наиболее ярко отображаются на диаграмме значений факторов для сводной выборки (рис. 3). Включения в магниево-вольфрамовых сферической формы (зерна 243, 315) представлены мелкими (5-8 микрон) изометричными зернами силикатно-железистого состава, где главными оксидами являются FeO, SiO₂, CaO, MgO (табл. 2). Эти включения обогащены P₂O₅ (1.17), SO₃ (1.17 %). Однако максимальной степенью обогащенности характеризуются две сферулы (пр. 519, 554), обнаруженные в кальциевых вольфрамовитах; среднее содержание в них: P₂O₅ - 3.65, SO₃ - 0.66, NiO - 0.50, CoO - 0.18, FeO - 91.9 %.

Рассмотрение включений в марганцевых вольфрамовитах начнем со стандартных нелопнувших сферул (пр. 303, 513, 517). Для них характерно максимальное содержание железа, по-видимому, в металлическом виде, и невысокое - оксидов (?) P, S, Cr, Ni, Co. Взорвавшиеся сферулы (зерна 238, 514), характерные только для Mn-вольфрамовитов, выделяются аномально высокими содержаниями P, S, Cr, Ni, Co. Только во взорвавшихся сферулах происходит перераспределение вещества: от донных частей микросферул к их горловинам наблюдается постепенная (пр. 238) или резкая (пр. 514) смена содержаний элементов. В пр. 238 происходит последовательное увеличение содержаний: (Fe - Mn - Cr, S - P - Ca, Ni, Co); в пр. 514 донная часть резко обогащена Fe, а горловинная - Mg, Co, Cr, P, S, Ni. В т. 514.15 обнаружено 13.1 Cr₂O₃, 10.6 P₂O₅, 3.2 SO₃, 0.65 NiO, 0.41 % CoO.

В пяти зернах Mn-вольфрамовитов (пр. 214, 250, 410, 533, 535) выявлены включения с аномальными содержаниями Cr₂O₃ (25.1 - 66.5 %). В случае максимальных содержаний Cr₂O₃ устанавливаются выделения хромшпинелида, который легко диагностируется по кристалломорфологии. При более низких содержаниях Cr₂O₃ наблюдается Cr-Fe-нераскристаллизованная фаза. Все переходы между этими крайними членами высокохромных включений можно наблюдать в одном зерне (пр. 410), которое представляет собой сгусток из четырех слипшихся сферул. Сохранившаяся между ними силикатно-железистая оболочка также обогащена Cr, P, S; в ней очень мало кремнезема, но высоки концентрации Al, Mn, Mg, Ca. Миндалины кальцита в Mn-вольфрамовите (пр. 113)

характеризуется переменным составом - от кальцита до манганкальцита. Около нее сохранилась силикатная концентрически-зональная оболочка толщиной 5-10 микрон, по составу аналогичная пр. 410.

Металлические сферулы. Выделено три типа сферул (1 - железистые, 2 - титан-железистые, 3 - медно-золотые), которые резко различаются по химическому составу и легко диагностируются. *Железистые* сферулы характеризуются стальным цветом, идеальной сферической формой, небольшими размерами (в среднем около 100 микрон), часто встречающимися сферическими пустотами и удивительно постоянным составом. В них отмечаются низкие содержания большинства оксидов (в сумме около 2 %). Эти сферулы резко отличаются от Cr-Fe-включений в волховитах низкими содержаниями Cr_2O_3 (менее 0.2 %). В двух случаях установлено высокое содержание в Fe-сферулах Na_2O (2.1), SO_3 (1.3) и Cl_2O (0.18 %).

Титан-железистые сферулы отличаются от предыдущего типа более низкими содержаниями FeO (41.5-81.9), аномально высоким TiO_2 (7.3-52.1) и заметно повышенными SiO_2 (11.3) и MnO (6.4 %). Как уже отмечалось, почти все они взорваны при освобождении излишков силикатной фазы. Наиболее высокотитанистые невзорвавшиеся сферулы (обр. 417) выделены в отдельный подтип. Они обогащены SiO_2 (16.7), Al_2O_3 (7.7), MnO (12.1), MgO (7.4 %), что приближает их по составу к Mn-волховитам.

Медно-золотые сферулы и зерна обнаружены В.М. Семиколенных в пробах суглинков с низким содержанием волховитов (20-100 зерен на 1 кг породы). Среди золотинок преобладают неправильной формы зерна размером до 0.1 мм; в редких случаях они достигают 0.3 мм и имеют при этом небольшие отросточки (пр. 701). Реже встречаются корродированные полусферы (пр. 702). В единичных случаях отмечаются идеальной формы сферические образования размером до 0.06 мм (пр. 705). Результаты микрозондового анализа пяти зерен золота показывают, что содержания его варьируют от 49 до 76 % и что при уменьшении содержаний золота резко возрастает количество меди - от 19 до 43 %. Постоянно присутствующее серебро обнаруживается в количестве 4-13 %; в одной точке встречен палладий (0.08 %). От сферических зерен золота (пр. 705) к корродированным полусферам (пр. 702, 703) и неправильной формы зернам (пр. 704) закономерно уменьшается содержание золота (76-66-58 %) и возрастает концентрация меди (19-23-35 %). Внутризерновая неоднородность распределения элементов практически не выражена и только в единственной крупной золотинке (пр. 701) в отросточках резко возрастает содержание меди (до 43.6 %).

Стекла и шлаки. В эту группу (рис. 2) включены все стекла, резко отличающиеся от волховитов полным отсутствием аэродинамических форм, повсеместно проявленным обломочным строением, характерным черным цветом и обилием пустот размером до 0.1 мм, что по текстурным особенностям приближает их к пемзам-шлакам и позволяет пользоваться термином «вспененные стекла». Шлаки, как и стекла, характеризуются обломочным строением, черным и иногда бурым цветом, крайне неоднородным внутренним строением и большим разнообразием форм: пластинки, неправильной формы обломки, резко удлиненные зерна. По химическому составу стекла и шлаки разделены на четыре типа, в которых постепенно уменьшаются содержания кремнезема (55-39-16-2 %) и увеличиваются концентрации железа (7-31-69-97 %). Эти типы названы нами вспененными силикатными стеклами, железисто-силикатными, силикатно-железистыми и железистыми шлаками.

Вспененные силикатные стекла по составу отвечают породам средне-основного состава (SiO_2 45-68 %) и отличаются повышенной железистостью и глиноземистостью. В одном из зерен с обилием пустот (пр. 428) отмечены высокие содержания P_2O_5 (до 1.3), Cr_2O_3 (0.08), NiO (0.1 %). В зерне с максимальной глиноземистостью (пр. 412) P_2O_5 не обнаружен, однако зафиксировано высокое содержание SO_3 (0.09) и Cr_2O_3 (0.12 %). Подтип высокомарганцовистых вспененных стекол (пр. 416) при очень высоком уровне

концентраций MnO (15-17 %) резко отличается от Mn-волховитов более высоким содержанием SiO₂ и Al₂O₃. Для подтипа высококальциевых стекол (CaO 17-33 %) характерна насыщенность SO₃ (до 1.5) и Cr₂O₃ (0.87 %).

Железисто-силикатные шлаки по составу близки к породам основного-ультраосновного состава (SiO₂ 35-48 %). Для них характерна крайняя неоднородность даже в пределах одного зерна (пр. 424). При этом они сохраняют устойчиво высокий уровень накопления Al₂O₃, Fe₂O₃ и K₂O (3.4-5.4%). Максимальная калиевоность характерна только для данного типа шлаков. Особняком в этом типе стоит проба 209, где на контакте с крупным зерном черного шунгитоподобного образования отмечается шлак с очень высоким содержанием P₂O₅ (1.8), SO₃ (0.78), NiO (0.16), CoO (0.07), Cl₂O (0.28 %); он выделен нами в отдельный подтип. Следует особо подчеркнуть, что нередко в одном зерне наблюдаются постепенные переходы от железисто-силикатных шлаков к силикатно-железистым (пр. 424) и даже чисто железистым (пр. 405).

Силикатно-железистые шлаки выделены как тип по преобладанию в них FeO над SiO₂. Однако по содержанию SiO₂ эти образования дают бимодальное распределение (около 35 и 4-11 %), которое компенсируется хаотическими скачками содержаний TiO, (до 2), Al₂O₃ (до 8), MnO (до 3), CaO (до 6), Na₂O (до 1), K₂O (до 2 %). Повышенных содержаний P, S, Cr, Ni, Co в них не обнаружено. Выделенный подтип нестандартных шлаков (пр. 203.1) характеризуется очень высокими концентрациями TiO₂ (7.3) и MnO (15 %); примечательно, что этот шлак встречен внутри титан-железистой сферулы и в значительной мере наследует ее состав.

Железистые шлаки представлены самородным железом (97 % Fe), с незначительной примесью силикатного материала. В одном зерне (пр. 610), которое выделено в самостоятельный подтип, отмечено высокое содержание Cr₂O₃ (0.9) и NiO (до 0.37 %). При дальнейших исследованиях шлаки, возможно, будут объединены в два типа: 1 - железистые (до 20 % SiO₂) и 2 - железисто-силикатные (более 30 % SiO₂).

Включения в других новообразованиях. Они немногочисленны и встречены в крайне редких экзотических образованиях: Fe-Ti-сферулах, в Fe-тектите и в стеклоглереде (?). Железо-титанистые сферулы (пр. 203, 504), имеющие размер не более 0.5 мм, несут отчетливые следы взрывных процессов. Центральная часть их нередко полая и содержит обломки шлаков, микролиты кварца, калиевого полевого шпата, кальцита, хлорита. В периферической зоне Fe-Ti-сферул наблюдаются многочисленные микросферулы (рис. 2, пр. 504), иногда выполненные микролитами перечисленных минералов, реже сложенные стекловатыми массами (пр. 203.2, 203.6, 504.5), по составу приближающимися к высококремнистым глиноземистым вспененным стеклам (группа 21) с максимальными содержаниями SiO₂ (72.4), Al₂O₃ (26.1), K₂O (5.9 %).

Железистые тектитоподобные образования встречены только в одном зерне, где нитевидной и неправильной формы железистый тектит буквально переплетен с Mn-волховитом неправильной формы (рис. 2, пр. 615). Этот образец является доказательством одностадийности образования волховитов и Fe-тектита. Включенное в Fe-тектит стекло (пр. 615-6) по составу полностью отвечает Mn-волховиту.

Большой интерес представляют включения стекла (пр. 124) в обломке голубого стеклоглереда (?), по обрамлению которого присутствуют мельчайшие (1-10 микрон) спекшиеся обломки различных стекол и минералов, крепко спаянные с нитевидными силикатными стеклами. Толщина нитей составляет 5-10 микрон, а протяженность - до 300 микрон. Состав их находится посередине между составами Mg- и Ca-волховитов, ближе всего отвечая составам их разностей, насыщенных летучими компонентами. Главное отличие нитевидных стекол от волховитов - высокий уровень накопления в них SiO₂ (57.5), Al₂O₃ (16.1) и относительно низкий - CaO (21.5 %). На некоторых обломках железистых шлаков нарастают спутанно-волоконистые пушистые агрегаты стекол близкого состава.

Минералы. При отборе для микронзондового анализа проб волховитов и ассоциирующих с ними сферул, стекол и шлаков особое внимание уделялось минералам, характеризующимся какими-либо нестандартными особенностями. В пробе 2012 были диагностированы апатит, барит, биотит, глаукоцит, гранаты, диопсид, доломит, ильменит, кальцит, кварц, магнетит, миллерит, монацит, полевые шпаты, роговые обманки, серпентин, торит, хлорит, шпинель, циркон. Предварительное их изучение показало наличие разностей, заметно обогащенных Mg, K, P, S, Cr, Ni, Co, Cl, Ba, Ce, La, Th. Часть таких минеральных зерен, возможно, связана с процессами образования волховитов и ассоциирующих с ними стекол, шлаков и сферул.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обоснование модели. В результате статистической обработки объединенного массива данных проб 2012 и 2035 методом главных компонент факторного анализа установлено (рис. 3), что петрогенные элементы отчетливо разделяются на три группы: 1 - P, Ni, Co, Fe, S; 2 - Cr, Ti, Mn, Mg, Ca; 3 - K, Si, Na, Al. Первая группа элементов характерна для включений в волховитах, железистых шлаках и сферул; вторая - для волховитов, силикатно-железистых шлаков и сферул; третья - преимущественно для минералов алюмосиликатного состава, реже для кремнеземистых шлаков и стекол. На диаграмме значений факторов этим трем группам элементов отвечают ареалы (*a*, *b*, *в*) распределения изучаемых объектов. Границы между ареалами (*L1* и *L2*), с нашей точки зрения, имеют генетический смысл. Действительно, все изученные минералы алюмосиликатного ряда расположены справа от линии *L2*; при этом темноцветные минералы расположены около *L2*, а светлые - на значительном удалении от линии; сверху вниз вдоль нее наблюдается смена пироксенов амфиболами, гранатами и биотитом. Поэтому с известной долей условности линию 2 можно рассматривать как своего рода границу литосферы и астеносферы. Заметим, что точки Mn-волховитов лежат ниже *L2*; Ca-волховиты (точка 5) - на линии *L2*; Mg-волховиты (точки 1, 2) - справа и слева от этой линии; поэтому можно предполагать, что магматические очаги Mn-волховитов располагались в верхней части астеносферы, а Ca- и Mg-волховитов - на границе астеносферы и литосферы. Граница между ареалами *a* и *b*, проведенная по *L2*, менее отчетливая; однако и она фиксируется по петрохимическим данным - по ней происходит резкая смена рудных элементов: *a* - Co, Ni, Fe; *b* - Cr, Ti, Mn. Если пользоваться терминологией В.Н. Ларина [2005], то линия *L2* разграничивает нижнюю часть металлосферы и ее верхнюю часть, астеносферу. По этим данным, для изучаемых образований можно наметить два петрогенетических ряда элементов: 1) металлосферный - P, Ni, Co, Fe, S, Cr, Ti, Mn и 2) литосферный - Mg, Ca, K, Si, Na, Al.

Таким образом, имеющиеся данные позволяют построенной статистической модели придать генетический смысл и с этих позиций еще раз рассмотреть главнейшие особенности волховитов и ассоциирующих с ними металлических сферул, стекол и шлаков.

Волховиты. Тектитоподобные стекла, по составу приближающиеся к породам основного состава, иногда описываются в геологической литературе [*Schulte et al., 2003; Glass et al., 2004*], однако встречаются крайне редко. Нам неизвестны находки микротектитов ультраосновного состава, тем более в ассоциации с основными микротектитами (Mn-волховитами), разнообразными металлическими сферулами, стеклами, шлаками и др. Единичные, близкие по составу к волховитам стекла ультраосновного состава, обнаружены в трех регионах России [*Жарков и Мальков, 2000*]. В Якутии на глубоких горизонтах алмазоносных трубок Айхал, Мир, Удачная и в плиоценовых отложениях Немской возвышенности Тиманского кряжа встречены «вулканические» стекла, по составу отвечающие маложелезистым разностям Ca-волховитов, а на р. Сев. Двина обнаружен стеклянный шарик позднепермского возраста, по составу

приближающийся к Mg-волховитам. В областях современного вулканизма стекол типа волховитов не встречено.

Уникальными являются петрохимические особенности волховитов и ярко выраженная индивидуальность трех их типов. Mg-волховиты состоят всего лишь из четырех оксидов (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3), причем высокие содержания двух последних в обычных магматитах являются запрещенными. Ярко выраженный «карбонатитовый оттенок» несут Ca-волховиты, содержащие около 34 % CaO . Не менее индивидуальны и Mn-волховиты, выделяющиеся аномальными концентрациями MnO (около 12 %) и постоянным присутствием Cr_2O_3 (около 1 %). Эти особенности волховитов позволяют высказать предположение, что в момент их образования в верхней части астеносферы существовали (возможно, существуют и сейчас) магматические резервуары соответствующего состава. Другая важная особенность волховитов - отсутствие различий между тремя типами стекол по содержаниям P, Ni, Co. Это, скорее всего, может быть объяснено лишь привнесением рассматриваемых элементов металлосферного ряда в магматические резервуары мощными газовыми потоками, что возможно при допущении правомочности концепции изначально гидридной Земли [Ларин, 2005].

Следует особо подчеркнуть проявление в волховитах таких процессов, как ликвация (существование силикатной оболочки сферул и обособление металлической фазы), а также активное выделение газовых компонентов из взорвавшихся сферул. Взрывные процессы приводили к тому, что на дневную поверхность в распыленном состоянии извергались мельчайшие капли силикатных расплавов, которые тут же застывали в процессе падения. Об этом свидетельствуют обилие аэродинамических форм, характерная коленообразная форма некоторых гантелевидных зерен волховитов и переплетение нитевидных стекол волховитов с металлическими тектитоподобными образованиями.

Металлические сферулы. Крайне необычными являются железистые сферулы, которые по составу полностью идентичны железистым шлакам. В этих сферулах не обнаружены P, Ni, Co, однако в нестандартных сферулах отмечаются высокие концентрации S и Cl при повышенных - Cr, Co. Имеющегося у нас количества анализов железистых сферул пока недостаточно для решения данного вопроса. Столь же трудно решаемыми являются вопросы присутствия обильных силикатных фаз в титан-железистых сферулах и механизмы формирования сферул медистого золота.

Стекла и шлаки. Обломочный характер стекол, их вспененность и газонасыщенность свидетельствуют о том, что они образовались до волховитов при процессах дифференциации в условиях астеносферы. Затвердевшие стекла и шлаки были взорваны при процессах образования волховитов и под напором мощных газовых потоков выбрасывались на дневную поверхность. В процессе активного движения этих обломков они нередко насыщались всеми элементами металлосферного ряда. Важнейшей особенностью волховитов и шлаков является ассоциация их с шунгитоподобными образованиями. Не имея данных об условиях образования этих пород, можно лишь высказать предположение, что они привнесены из наиболее глубоких зон.

Минералы. Большинство изученных минералов образовалось в условиях литосферы. Однако в процессе образования волховитов могли формироваться ториевые фосфаты, изменяться геохимические особенности ранее образовавшихся минералов и происходить их переотложение. Все эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

Генетическая модель. Нами предложена «криптомагматическая» модель образования волховитов как нового типа эндогенных тектитоподобных стекол. Формирование волховитов связывается с тремя этапами развития геологических процессов: 1 - доголоценовым; 2 - криптомагматическим; 3 - заключительным.

Доголоценовый этап. В пределах литосферы выделяются архейско-среднепротерозойский этап складчатого развития района, позднепротерозойско-неогеновый платформенный этап, четвертичный ледниковый период, который завершился 10 000 лет назад формированием суглинков валдайского оледенения. Под покровами

суглинков наблюдаются скрытые разломы глубокого заложения, в узлах пересечения которых и могли образовываться каналы для последующей криптомагматической деятельности. В доголоценовый этап в металлосфере [Ларин, 2005] произошла сильная дифференциация вещества, которая привела к преимущественному накоплению Р, Ni, Со, Fe, S в низах металлосферы и Fe, S, Cr, Ti, Mn в верхах этой оболочки Земли, в соответствии с указанным выше металлосферным рядом элементов. В пределах астеносферы накапливались различные стекла и шлаки, причем железистые разности их локализовывались в низах астеносферы, а силикатные - в верхах. По-видимому, в верхней части астеносферы в четвертичное время локализовались магматические резервуары с резко различными по составу расплавами: а - железистые, с дифференциатами Au, Cu внизу и Cr, Ti, Mn вверху; б - основные по составу, высокомарганцовистые и высокохромистые; в - ультраосновные высококальциевые; г - ультраосновные, высокомагниевые и калиевые (лампроитовые ?).

Криптомагматический этап. После величайшей на Земле катастрофы [Изох, 1997] около 10 000 лет назад началась активная криптомагматическая деятельность. Предполагается, что в верхней части ядра Земли образовалась планетарная зона генерации протонно-водородных струй, трассирующая Австрало-Скандинавский тектитовый пояс. Отдельные наиболее мощные газовые струи, дошедшие затем до поверхности Земли, захватывали обломки шунгитоподобных образований и силикатно-железистых шлаков и в виде шлако-каменно-газовой смеси внедрялись в астеносферу. Эти восходящие струи «протыкали» астеносферные магматические резервуары, захватывали капли расплавов, обломки силикатных стекол и шлаков и внедрялись в литосферу в виде шлако-каменно-расплавно-газовой «криптомагматической» смеси. В литосфере эти струи обогащались обломками пород и минералов докембрийского фундамента, захватывали вспученную кембрийскую глину, ордовикские известняки и под большим давлением в узко локальной зоне извергались на дневную поверхность в виде шлако-каменно-расплавно-грязе-газовой смеси. Капли расплавов практически мгновенно застывали в воздухе в виде тектитоподобных стекол, а извергавшаяся туффзитоподобная смесь перемешивалась с флювиогляциальными суглинками.

Заключительный этап. Предполагается, что после криптомагматического этапа формирования волховитов на фоне быстрого уменьшения температур и смены резко восстановительных условий на окислительные происходила метасоматическая деятельность и дополнительные инъекции глинистого материала. Последнее подтверждается многочисленными находками прожилков голубых эндогенных (?) глин среди бурых и пестроокрашенных суглинков. Последующие эрозионные процессы сильно затушевывали результаты криптомагматической деятельности, а техногенные процессы внесли дополнительные сложности в решение вопросов диагностики природных стекол.

Некоторые следствия. Попытаемся сформулировать некоторые вопросы, требующие дальнейшего развития в свете полученных результатов.

Первостепенное значение приобретают вопросы развития наших представлений о магматической дифференциации, о роли летучих при глубинных геологических процессах, о генезисе углеводородных скоплений и др. [Маракушев, 1999]. Полученные данные могут существенно повлиять на основы туффзитовой модели образования красновишерских месторождений [Чайковский, 2001] и на современные представления о магмагенных флюидизитах [Петровский и др., 2004; Махлаев и Голубева, 2006]. В прикладном аспекте важной представляется необходимость заново картировать Киришскую структуру как объект поисков эндогенного оруденения четвертичного возраста. Первоочередное значение здесь имеет находка вместе с волховитами видимого золота. Следует обратить внимание на Р, Cr, Ni, Со, рудопроявления которых могут быть обнаружены на незначительных глубинах. Не исключено, что волховитоносные суглинки окажутся индикаторами скрытых на глубине палеозойских алмазоносных тел

туффизитового типа. Допускается возможность обнаружения алмазной минерализации голоценового возраста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований можно сформулировать в следующем виде.

1. Волховиты - новый тип тектитоподобных эндогенных стекол основного и ультраосновного состава, представленных небольшими (1-3 мм) зернами с характерными аэродинамическими формами и прекрасной сохранностью. Предполагаемый возраст стекол - около 10 000 лет, после валдайского оледенения. Волховиты разделяются на три типа: существенно магниевые, кальциевые и марганцевые, между которыми нет переходных разностей. По петрохимическим данным, устанавливаются очень сильные различия между типами стекол, слабые различия между зернами внутри типа и отсутствие внутризерновой изменчивости. Включения в волховитах представлены существенно железистыми металлическими фазами, присутствующими в виде сферул и редких минеральных обособлений, обогащенных P, Ni, Co, S, Cr.

2. Металлические сферулы представлены железистыми, титан-железистыми и медно-золотыми разностями; последние содержат 49-76 % Au, высокий процент меди и 4-13 % серебра. Стекла и шлаки, ассоциирующие с волховитами, разделены на железистые, силикатно-железистые и железисто-силикатные шлаки и вспененные силикатные стекла среднеосновного состава.

3. Статистический анализ петрохимических данных волховитов, стекол, шлаков позволил выделить два генетических ряда элементов: глубинный - P, Ni, Co, Fe, S, Cr, Ti, Mn и литосферный - Mg, Ca, K, Si, Na, Al. На этой основе предложена крипто-магматическая модель. Она предполагает формирование вспененных стекол и шлаков в доголоценовый этап в астеносфере, а волховитов на границе астеносферы и литосферы с последующим прорывом шлако-каменно-расплавно-грязе-газовой смеси на дневную поверхность, практически мгновенное застывание капель расплава в воздухе в виде тектитоподобных стекол и перемешивание извергавшейся туффизитоподобной смеси с флювиогляциальными суглинками.

Авторы благодарны М.Н. Толкачеву, выполнившему основной объем аналитических работ, Д.Г. Скублову за неоценимую помощь при компьютерной обработке данных и геологам М.Н. Афанасову, А.П. Казаку, М.С. Лейкуму, способствовавшим решению ряда стоящих перед авторами задач.

Список литературы

Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М: Недра, 1982. 269 с.

Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 2. М: Недра, 1990. 427 с.

Жарков В.А., Мальков Б.А. Кимберлитовые стекла, проблема кимберлитового вулканизма и проблема алмазности южных районов Республики Коми // Вестник Института геологии Коми НЦ. 2000. № 8. С. 4-5.

Изох Э.П. Австрало-азиатские тектиты и глобальная катастрофа около 10 000 лет тому назад, вызванная столкновением Земли с кометой // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 3. С. 638-660.

Импактиты. М.: Изд-во МГУ, 1981. 240 с.

Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М: Агар, 2005. 248 с.

Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 253 с.

- Маракушев А.А., Богатырев О.С., Феногенов А.Д. и др.* Импактогенез и вулканизм // Петрология. 1993. Т. 1. №6. С. 571-595.
- Марин Ю.Б., Скублов Г.Т., Ванштейн Б.Г.* Петрохимическая эволюция фанерозойских гранитоидных формаций. Л.: Недра, 1983. 151с.
- Махлаев Л.В., Голубева И.И.* Магматогенные флюидизированные (псевдосжиженные) системы и их роль в пороодообразовании и сопутствующей минерализации / Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 143-159.
- Нечаева И.А.* Множественные метеоритные взрывы как геологический фактор. М.: Недра, 1982. 120 с.
- Панова Е.Г., Казак А.П., Якобсон К.Э.* Минералогические особенности девонских терригенных пород северо-запада Русской платформы в связи с проблемой их алмазности // ЗВМО. 2004. № 3. С. 12-24.
- Петровский В., Махлаев Л., Пыстин А. и др.* Алмазоносные витериты - возможный ключ к разгадке тайн природы бразильских филлитов, австралийских лампроитов и архангельских кимберлитов // Вестник Института геологии Коми НЦ, 2004. № 12. С. 15-30.
- Скублов Г.Т., Тюгай О.М.* Петрохимическая модель образования тектитоподобных стекол кратера Жаманшин и связь их с лунным импактогенезом // ЗВМО. 2004. № 6. С. 95-117.
- Скублов С.Г., Ловягин В.А., Скублов Г.Т., Тюгай О.М.* Геохимия микротектитов кратера Жаманшин // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2005. Вып. 4. С. 17-25.
- Скублов С.Г., Тюгай О.М.* Геохимия импактных стекол кратера Жаманшин (по данным ионного микрозонда) // Геохимия. 2005 а. № 7. С. 779-785.
- Скублов С.Г., Тюгай О.М.* О распределении редких элементов в импактных стеклах кратера Жаманшин (сопоставление с тектитами) // Геохимия. 2005 б. № 11. С. 1228-1234.
- Фельдман В.И.* Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 1990. 299 с.
- Флоренский П.В., Дабижва А.И.* Метеоритный кратер Жаманшин. М.: Наука, 1980. 128 с.
- Чайковский И.И.* Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластитов Вишерского Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. 324 с.
- Barnes V.E.* Tektite research 1936-1990 // Meteoritics. 1990. Vol. 25. P. 149-159.
- Barrat J.A., Jahn B.M., Amosse J. et al.* Geochemistry and origin of Libyan Desert glass // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. Vol. 61. P. 1953-1959.
- Bouska V.I. et al.* Natural glasses. Praha.: Acad., 1993. 354 p.
- Deutsch A., Ostermann M., Masaitis V.L.* Geochemistry and neodymium-strontium isotope signature of tektite-like objects from Siberia (urengoites, South-Ural glass) // Meteor. Planet. Sci. 1997. Vol. 32. P. 679-686.
- Glass B.P., Huber H., Koeberl C.* Geochemistry of Cenozoic microtektites and clinopyroxene-bearing spherules // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. Vol. 68. P. 3971-4006.
- Heide G., Muller B., Kloess G. et al.* Structural classification of natural non-crystalline silicates // J. of Non-Crystalline Solids. 2003. Vol. 323. P. 68-71.
- Heide K., Heide G., Kloess G.* Glass chemistry of tektites // Planet. Space Sci. 2001. Vol. 49. P. 839-844.
- Heinen G.* Tektites - witnesses of cosmic catastrophes. Luxembourg, 1998. 189 p.
- Koeberl C.* Geochemistry of tektites and impact glasses // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1986. Vol. 14. P. 323—350.
- Koeberl C.* Tektite origin by hypervelocity asteroidal or cometary impact: Target rocks, source craters, and mechanisms / Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution (Eds B.O. Dressier, R.A.F. Grieve, V.L. Sharpton), 1994. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 293. P. 133-151.
- Marini F.* Natural microtektites versus industrial glass beads: an appraisal of contamination problems // Journal of Non-Crystalline Solids. 2003. Vol. 323. P. 104-110.

- Montanari A., Koeberl C.* Impact stratigraphy: the Italian record. Berlin: Springer, 2000. 364 p.
- O'Keefe J.A.* Tektites and their origin. Amsterdam: Elsevier. 1976. 254 p.
- O'Keefe J.A.* Reply to Taylor and Koeberl // *Meteoritics*. 1994. N 29. P. 743-744.
- Povenmire H.* Tektites. A cosmic paradox, 1997. 112 p.
- Scholze H.* Glass. Berlin: Springer, 1990. 236 p.
- Schulte P., Stinnesbeck W., Stiiben D. et al.* Fe-rich and K-rich mafic spherules from slumped and channelized Chicxulub ejecta deposits in the northern La Sierrita area, NE Mexico // *Int. J. Earth Sci.* 2003. Vol. 92. P. 114-142.
- Vogel W.* Glaschemie. Berlin: Springer, 1992. 371 p.

Поступила в редакцию 1 сентября 2006 г.

Ссылка на статью:



Скублов Г.Т., Марин Ю.Б., Семиколенных В.М., Скублов С.Г., Тарасенко Ю.Н. Волховиты – новый тип тектитоподобных стекол. Записки Российского Минералогического общества, 2007, № 1, с. 50-68.