

С. А. Вишнеvский, Л. Н. Гилинская, С. М. Лебедева,
Н. А. Пальчик, Л. Н. Пospelова

**ФЛЮИДАЛЬНЫЕ ТОНКО-ПОЛОСЧАТЫЕ ИМПАКТНЫЕ
СТЕКЛА В ЗЮВИТАХ НЕКОТОРЫХ АСТРОБЛЕМ
(И СРЕДИ НЕКОТОРЫХ ТЕКТИТОВ):
АККРЕЦИОННО-СМЕСИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
ОБРАЗОВАНИЯ ВО ВЗРЫВНОМ ОБЛАКЕ
КРУПНЫХ ИМПАКТНЫХ СОБЫТИЙ**

S. A. Vishnevsky, L. N. Gilinskaya, S. M. Lebedeva,
N. A. Palchik, L. N. Pospelova

**FLUIDAL FINELY BANDED IMPACT GLASSES FROM
SUEVITES OF SOME ASTROBLEMES (AND AMONG SOME
TEKTITES): A MIXING-ACCRETION MODEL OF ORIGIN
IN EXPLOSION CLOUD OF LARGE IMPACT EVENTS**

Finely banded impact glasses from the Popigai and Zhamanshin impact structures using petrographic, chemical, X-ray, microprobe, gas chromatographic, electrone spin resonance and Mossbauer methods have been studied. Comparative investigation of Muong Nong-type tektites from Vietnam was also performed. Our data show that the Popigai and Zhamanshin banded glasses are quenched heterogeneous mixtures of impact melts derived from differing sources in the target. These glasses are interpreted as the result of mixing and accretion of very mobile high-temperature impact melts at colliding of jets in the explosion cloud. Heterogeneities in water content, iron oxidation state, and bulk composition were either inherited from the target rocks or occurred during interaction in the explosion cloud. We propose that these glasses be considered as a special «zhamanshinite facies» (or «ZH-glasses») of impact melt rocks. The glasses of ZH-facies may have a broader distribution in suevites from many impact structures, especially from those, which occurred on two-stage target with sedimentary cover. The Muong Nong-type tektites can also be considered as glasses of the ZH-facies, being any transition chain between the tektites themselves and impact glasses of the meteoritic structures.

Введение

Флюидалные тонкополосчатые импактные стекла, представленные чередованием различно окрашенных полос, широко распространены в импактных структурах [1, 2, 11, 26, 36 и др.] и обычно рассматриваются как продукты локального импактного плавления, не претерпевшие полной гомогенизации. Однако детальное изучение ряда таких стекол из зювитов Попигайской астроблемы показало, что их текстура связана с гетерогенным распределением воды, унаследованным из пространственно различных источников в мишени, а сами эти стекла возникли при смешении различных расплавов [63–66]. Такой вывод указывает на сложное многостадийное образование данных стекол. Далее было установлено, что некоторые флюидалные тонкополосчатые импактные стекла из кратера Жаманшин (Казахстан) также имеют сложное происхождение. Полосчатость данных стекол связана в одних случаях с неоднородной степенью окисления железа, а в других случаях – с этим же фактором, но в сочетании с различиями химического состава полос стекла [66]. Эти особенности также определяют сложное образование данных стекол и их множественные родительские источники. Таким образом, выявилась довольно специфическая группа флюидалных тонкополосчатых импактных стекол, особенности и происхождение которых являются предметом настоящей работы. Более того, оказалось, что тектиты типа Муонг-Нонг из Вьетнама являются довольно близким аналогом некоторых из таких стекол.

Исследованные образцы

Изучены пять образцов флюидалных тонкополосчатых стекол Попигайской астроблемы (рис. 1А), десять образцов аналогичных стекол из кратера Жаманшин (рис. 1Б) и четыре образца вьетнамских тектитов (их тонкополосчатые разности представлены на рис. 1Г). Мы также предварительно исследовали некоторые особенности петрографии и вещественного состава тонкополосчатых стекол из кратера Эльгыгытгын (рис. 1В), однако эти результаты в настоящей работе не приводятся.

Исследованные стекла Попигайской астроблемы образуют неправильные или уплощенные, пористые или массивные, темно-зеленые или черные обломки или глыбы-бомбы величиной от первых см до 0.4 м [7]. Эти стекла обнаружены только в двух типах зювитов: зювитах далдынской формации и формации зювитовых песков, где они наблюдаются в ассоциации с другими разностями импактных стекол кратера. Указанные отложения взрывного облака

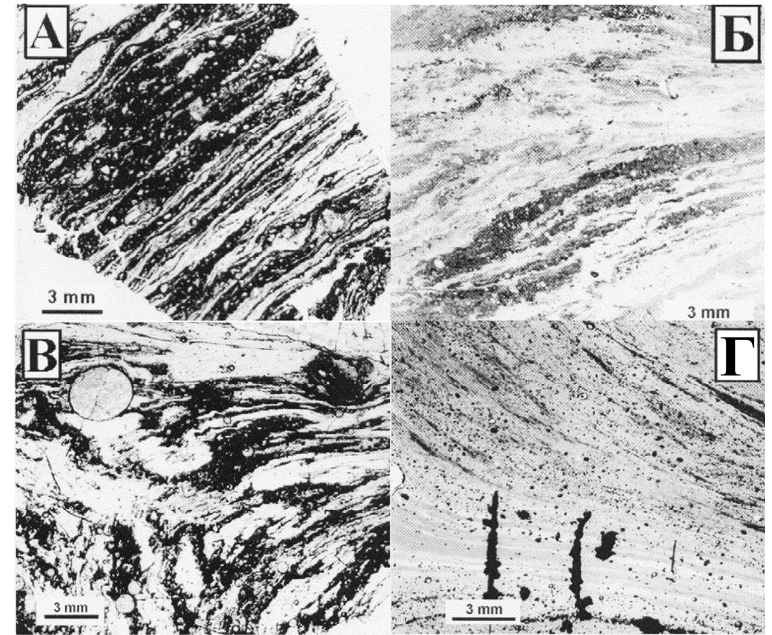


Рис. 1. Микрофотографии тонкополосчатых стекол в шлифах.

А – переслаивание стекол I типа (светлое) и II типа (темное) в образце П 2154/2 из Попигайской астроблемы; Б – переслаивание стекол I типа (светлое), II типа (серое) и IV типа (темное) в образце Ж 2-3 из кратера Жаманшин; В – переслаивание стекол I типа (светлое) и II типа (темное) в образце Э-26 из кратера Эль-гыгытгын; Г – переслаивание стекол I типа (светлое) и II типа (серое) в образце МНТ-3 тектитов типа Муонг-Нонг; черные флюидальные линзы в этом образце представляют пенистые полосы, сложенные микроскопическими пузырьками; черные секущие тела представляют трещины растяжения, заполненные вторичными минералами.

выделены в предложенной ранее оригинальной классификации импактитов Попигайской астроблемы [3, 6, 65] и слагают верхнюю часть колонны зювитов кратера; материал этих формаций отлагался в относительно холодном состоянии. Бомбы тонкополосчатых стекол в основном аутоморфны и обладают сложной скульптурой поверхности, которая возникла в результате закалочного отверждения в полете. Часть таких бомб приобрела поверхности откола, возникшие при дроблении во время полета и отложения. Однако, некоторые крупные бомбы описываемого стекла отлагались в пластичном или горячем состоянии и несут следы деформации или сваривания с вмещающим зювитом.

Флюидальные тонкополосчатые стекла кратера Жаманшин (часть из них соответствует так называемым «тектитам-жаманшин-»

нитам», выделенным Изохом [11]) представляют в различной степени пористые черные обломки и бомбы величиной от первых см до 10–20 см. Макроскопически они очень сходны с тектитами типа Муонг-Нонг из австрало-азиатского поля рассеяния. Это сходство неоднократно подчеркивалось различными авторами [11, 51, 62], и было использовано некоторыми из них [11, 12] как основа для гипотез о генетической взаимосвязи австрало-азиатских тектитов с кратером Жаманшин. Поверхности бомб описываемых стекол обладают сложной скульптурой с многочисленными кавернами, полосами, «выростами», трещинами растяжения типа «хлебной корки» и другими признаками, свидетельствующими о закалочном отвердении стекла во время полета. Некоторые бомбы несут следы хрупкого откола с шероховатой или раковистой поверхностью. Следы аэродинамической обработки бомб во время полета отсутствуют. Как указывает Э. П. Изох [11], распределение тонкополосчатых стекол на валу и внутри кратера характеризуется множеством небольших, от 30 до 200 м в поперечнике, пятен-ареалов, которые беспорядочно рассеяны среди выветрелых обломочных масс, представленных перемешанным материалом пород мишени. Эти вмещающие массы слагают верхнюю часть аллогенного выполнения кратера и, по-видимому, представляют одну из его зювировых формаций. Кроме описываемых тонкополосчатых стекол, в составе этой формации известны и другие импактные расплавные породы. Они характеризуются большим разнообразием и также обладают «ареальным» распределением во вмещающей массе. Номенклатуры импактных стекол кратера, предложенные П. В. Флоренским [25, 26], Э. П. Изохом [11], В. Л. Масайтисом [18] и другими авторами, очень сложны и противоречивы, потому что каждый из указанных авторов предпочитал свою собственную терминологию и классификацию этих пород (импактиты «первого» и «второго» рода, «иргизиты», «такситы», «тектиты-жаманшиниты», «основные иргизиты» и так далее). Между тем, большое разнообразие вещественного состава и облика весьма характерно для импактных стекол во многих астроблемах. Поэтому все стеклосодержащие породы кратера, кроме флюидалных тонкополосчатых стекол, мы рассматриваем как обычные продукты импактного плавления и в дальнейшем изложении их больше не касаемся.

Два из исследованных тектитов Вьетнама (образцы КТ-1 и КТ-2, рис. 2) представляют округлые каплеобразные тела черного пористого стекла (каплеобразные тектиты в нашем описании, или «splash-form tektite type», по [56]). Два других образца представляют стекла типа Муонг-Нонг («Myong Nong-type tektites», по [56]):

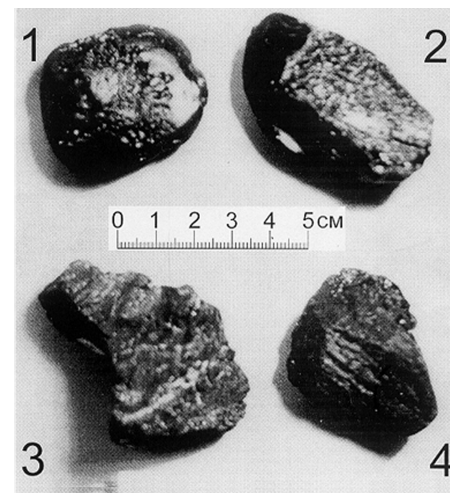


Рис. 2. Исследованные тектиты Вьетнама: каплеобразные тела (вверху, слева направо, № 1 и № 2 – образцы КТ-1 и КТ-2) и тектиты типа Муонг-Нонг (внизу, слева направо, № 3 и № 4 – образцы МНТ-3 и МНТ-4).

бесформенные обломки с аутоморфной полосчатой поверхностью и трещинами растяжения типа «хлебной корки» (образцы МНТ-3 и МНТ-4, рис. 2). Вес исследованных образцов составил 48.38 г (КТ-1), 53.00 г (КТ-2), 80.27 г (МНТ-3) и 50.54 г (МНТ-4). Во Вьетнаме эти стекла были собраны в типичном для этого материала геологическом положении [12].

Методы и техника исследований

Кроме петрографической микроскопии, исследованные образцы изучались методами «влажного» химического анализа, микронзондового анализа, рентгеноструктурного анализа, газовой хроматографии, электронного парамагнитного резонанса и Мессбауэровской спектроскопии. Список образцов и выполненных анализов приведен в табл. 1.

Валовый химический состав стекол по методу «влажного» химического анализа (см. описание в работах [9, 10]) выполнялся в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии (ОИГГМ СО РАН) г. Новосибирска и в Институте минералогии г. Миасса. Контрольные суммы анализов составляли 99.9 ± 0.9 вес. %.

Микронзондовые анализы выполнялись в ОИГГМ СО РАН г. Новосибирска на микронзонде «Самебах» (напряжение 20 кV, ток 20 мА, диаметр пучка электронов 4–5 мкм; при анализе стекол этот пучок был расфокусирован до диаметра 15–20 мкм). Для коррекции результатов использовались стандартные ZAF-процедуры. Относительная ошибка определений, как считают исполнители анализов, составляла порядка 1 отн. % для Si и Al; для Fe, Ca, Mg, Na и K эта ошибка составляла порядка 2–3 отн. %. Пределы обнаружения Ti, Mn и P составляли порядка 0.02–0.03 вес. %. Подробности

Таблица 1

Реестр образцов и выполненных анализов

№ образцов	ВХС		РС	ГХ		ЭПР	МСС
	А	Б		А	Б		
П 2154/1а	+	+	+	+	+		
П 2154/2	+	+	+	+	+		+
П 2154/2а	+	+		+	+		+
П 2154/3а	+	+	+	+	+	+	+
П 2156/2	+	+	+	+	+	+	
Ж 1-2	+	+	+	+	+		+
Ж 1-6	+	+	+	+	+	+	+
Ж 2-1	+	+	+	+	+	+	+
Ж 2-2	+	+	+	+	+	+	
Ж 2-3	+	+	+	+	+	+	
Ж 3-3	+	+	+	+	+	+	+
Ж 10	+	+	+	+	+	+	+
Ж 11	+	+	+	+	+	+	+
Ж 12	+	+	+	+	+	+	+
Ж 13	+	+	+	+	+	+	+
КТ 1	+	+	+	+			+
КТ 2	+	+	+	+			
МНТ-3	+	+	+	+			+
МНТ-4	+	+	+	+			+

Примечание: Образцы представлены стеклами Попигайской астроблемы (П), кратера Жаманшин (Ж) и тектиты Вьетнама (КТ – каплеобразные тектиты; МНТ – тектиты типа Муонг-Нонг); ВХС – валовый химический состав, определенный «влажным» химическим методом (А) и микрозондовым анализом (Б); РС – фазовый рентгеноструктурный анализ; ГХ – хроматографический газовый анализ для образца в целом (А) и для светлых и темных полос стекла по отдельности (Б); ЭПР – изучение методом электронного парамагнитного резонанса; МСС – Мессбауэровский анализ.

метода описаны в работе [14]. Сравнение результатов «влажного» химического и микрозондового анализов одних и тех же образцов из Попигайской астроблемы (где исследованные стекла имеют весьма однообразный состав, табл. 2, 3) показало удовлетворительную сходимость составов этих стекол по содержаниям всех химических компонентов, за исключением кремнезема. В последнем случае различие составляет в среднем 2.8 вес. % и указывает на систематическое занижение результатов микрозондового анализа по кремнезему, что, соответственно, привело к заниженным общим суммам результатов этого анализа. Поскольку микрозондовые

Таблица 2

**Валовый химический состав (вес. %) тонкопосчатых стекол Попигайской астроблемы, кратера Жаманшин
и вьетнамских тектитов, полученный классическим «влажным» методом**

№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O-	ппп	Сумма
П 2154/1a	64.21	0.76	15.10	5.46	1.04	4.08	3.69	0.08	2.00	2.88	0.08	0.20	н.а.	99.58
П 2154/2	63.09	0.70	14.64	5.03	1.47	4.02	3.50	0.06	2.04	2.97	0.10	0.18	1.63	99.43
П 2154/2a	63.40	0.75	14.90	4.80	2.80	4.10	3.40	0.07	1.94	2.63	0.06	0.16	1.66	100.67
П 2154/3a	64.40	0.68	15.00	4.89	0.87	4.21	3.58	0.07	1.86	2.64	0.05	0.10	1.36	99.71
П 2156/2	65.37	0.73	14.67	6.16	н.а.	3.95	0.52	0.07	2.06	2.41	0.15	1.16	2.77	100.02
Ж 1-2	77.40	0.55	11.30	2.87	1.11	0.54	0.70	0.09	1.77	2.89	0.12	0.06	0.44	99.84
Ж 1-6	76.00	0.62	11.80	3.60	0.70	0.30	0.90	0.10	1.75	2.85	0.09	0.06	0.48	99.25
Ж 2-1	73.80	0.58	12.50	3.50	1.00	1.80	1.20	0.07	1.76	2.90	0.36	–	0.40	99.87
Ж 2-2	76.00	0.52	11.20	3.20	0.80	1.30	1.00	0.07	1.89	2.90	0.30	–	0.40	99.58
Ж 2-3	76.56	0.60	10.63	3.25	0.58	0.52	0.68	0.08	1.84	2.70	н.а.	н.а.	н.а.	97.44
Ж 3-3	72.70	0.91	14.10	5.80	0.60	0.50	1.10	0.09	1.07	2.23	0.09	0.04	0.82	100.05
Ж 10	76.60	0.62	11.70	3.10	1.10	0.50	0.80	0.09	1.71	2.73	0.09	–	0.40	99.44
Ж 11	75.60	0.59	12.80	3.45	0.87	0.54	0.70	0.07	1.72	2.87	0.10	0.08	0.56	99.95
Ж 12	77.60	0.62	11.00	3.10	0.90	0.20	0.80	0.08	1.74	2.85	0.06	0.06	0.38	99.39
Ж 13	76.00	0.61	12.50	3.52	0.49	0.54	0.76	0.09	1.78	2.94	0.10	0.10	0.51	99.94
КТ 1	72.16	0.87	11.99	5.42	0.83	2.00	2.60	0.10	1.42	2.34	0.07	0.16	н.а.	99.96
КТ 2	72.02	0.78	12.27	5.03	0.82	2.00	2.20	0.11	2.10	2.62	0.09	0.18	н.а.	100.22
МНТ 3	75.04	0.82	11.21	4.38	0.99	1.41	1.58	0.09	1.50	2.70	0.12	0.26	н.а.	100.10
МНТ 4	73.12	0.78	11.32	5.13	0.71	2.10	2.15	0.09	1.46	2.67	0.11	0.18	н.а.	99.82

Примечание: здесь и далее см. таблицу 1 для идентификации образцов; «←» – не обнаружено; «н.а.» – анализ не выполнялся.

Таблица 3

Валовый химический состав (вес. %) тонкопослойчатых импактных стекол из Попигайских зювитов, определенный микрозондовым анализом (средние значения нескольких индивидуальных анализов по каждому типу стекла)

№ образца	Тип стекла	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	Сумма*
П 2154/1а	I (8)	63.03	0.78	14.86	6.41	4.05	4.05	0.07	1.85	2.85	н.а.	97.94	98.18
	II (7)	61.14	0.82	15.85	6.87	4.07	4.05	0.10	2.05	3.11	н.а.	97.77	98.31
П 2154/2	I (5)	61.49	0.78	16.00	6.31	4.09	4.05	0.09	2.12	3.18	0.07	98.18	98.84
	II (4)	59.50	0.77	16.18	6.65	4.39	3.94	0.07	1.84	3.46	0.08	97.89	99.82
П 2154/2а	I (4)	61.96	0.82	15.78	6.95	4.04	3.90	0.08	1.82	3.01	0.05	97.79	98.65
	II (5)	60.55	0.78	17.37	6.50	4.52	3.06	0.08	1.99	2.54	0.10	97.48	99.25
П 2154/3а	I (4)	62.18	0.79	15.93	6.22	4.64	4.16	0.07	1.91	3.09	0.07	99.05	99.55
	II (7)	59.67	0.83	17.18	7.48	2.74	3.52	0.08	1.09	3.87	0.07	96.53	98.71
П 2156/2	I (4)	62.09	0.77	15.53	6.48	4.21	3.99	0.08	1.84	3.14	0.07	98.19	99.25
	II (5)	61.03	0.87	16.68	6.58	4.25	2.80	0.07	2.25	3.25	0.07	97.75	100.38

Примечание: тип I (чистое стекло) и тип II (раскристаллизованное стекло) – см. петрографическое описание в тексте; цифры в скобках после указания типа стекла обозначают количество индивидуальных анализов; «FeO» = FeO + Fe₂O₃; «н.а.» – анализ не выполнялся; * – приведена сумма с добавлением количества летучих, определенных газовым хроматографическим анализом (см. таблицу 6).

анализы всех стекол были выполнены одним и тем же стандартным способом при стабильной работе прибора, мы полагаем, что такая систематическая ошибка мало повлияла на результаты сравнения стекол между собой. Однако, при сопоставлении с литературными данными по составам стекол, эта ошибка должна учитываться.

Газовые хроматографические анализы выполнялись в ОИГГМ СО РАН г. Новосибирска на устройстве конструкции Н. Ю. Осоргина [21–23]. Это устройство позволяет анализировать такие термо-выделяемые газы как H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , N_2 и газы группы CH_4 . Устройство калибруется на определение воды с помощью стандартных образцов кордиерита (1.34 ± 0.1 вес. % H_2O) и кварца (0.0624 вес. % H_2O). Качество определений постоянно контролируется фоновым определением воды до и после анализа. Навеска образца в 100 мг, измельченная до фракции $<0.25 + 0.1$ мм подвергается ступенчатому нагреву до 500°C , 700°C и 800°C ; на каждой из этих ступеней время экстракции газов составляет 10 минут, а затем производится количественный анализ выделяемых газов; на последней ступени нагрева (800°C) анализ выполняется многократно, вплоть до полного прекращения регистрируемого газоотделения.

Относительная точность анализа для каждого экстрагируемого газа составляет: H_2O – 15–16 %; CO_2, CO – 9–10 %; H_2 – 22–25 %; N_2 – 9–10 %; CH_4 – 7–12 %. В последнее время появились работы, показывающие преимущества ИК-спектromетрии в определении воды в стеклах [30, 50] в связи с тем, что силикатные расплавы способны удерживать часть этой воды даже при температурах в 1900°C . Однако основная часть воды экстрагируется из стекол при температурах до 800 – 900°C , а оставшееся количество незначительно и близко к относительной ошибке измерений, которая присуща как нашим газовой-хроматографическим анализам (± 15 – 16 %), так и ИК-спектрометрическим анализам (± 5 % по [30]). Об этом, в частности, говорит сравнение наших результатов по определению содержания воды в стеклах кратера Жаманшин и тектитах с ИК-спектрометрическими данными по [30, 50] (см. ниже).

Фазовый рентгеноструктурный анализ проводился в ОИГГМ СО РАН г. Новосибирска на диффрактометре ДРОН-5. Измельченные до состояния пудры порции стекла анализировались при напряжении 40 kV и токе в 30 mA; использовалось фильтрованное (Fe-фильтр) излучение CuK_α .

Электронные парамагнитные определения выполнялись в ОИГГМ СО РАН г. Новосибирска на радиоспектрометре «Radiopan SE/X 2544» ($\lambda = 3.2$ cm; $f_{\text{mod}} = 100$ kHz) при комнатной

температуре ($T = 293 \text{ K}$). Интегральные интенсивности спектральных линий были оценены в относительных единицах.

Мессбауэровские исследования были выполнены в Институте минералогии г. Миасса на спектрометре МС-2201 с источником излучения ^{57}Co (Ст-матрица) в режиме постоянных ускорений; количество точек спектра составило 512, а аппаратная ширина линий в исследованном диапазоне доплеровских скоростей – 0.23 мм/с. Измерения проводились при комнатной температуре. Образец представлял собой порошкообразную навеску 150–200 мг, нанесенную на тонкую алюминиевую подложку с помощью клеевой основы. Математическая обработка спектров производилась при помощи программы MOSTEC, использующей метод наименьших квадратов.

Петрография и минералогия

Стекла Попигайской астроблемы. Флюидальные тонкополосчатые стекла Попигайской астроблемы, ранее описанные в литературе [7, 64, 65], представляют закаленные разности с переменным количеством мелких (0.0n–0.n мм величиной) газовых пузырьков (от первых до 20 об. %), а также обломков пород и минералов мишени (размерность 0.0n–0.n мм, содержание от первых до 20–30 об. %). Описываемые стекла сложены тонким до микрополосчатого чередованием двух разностей (рис. 1А). Стекла I типа в шлифах чистые прозрачные бледно-зеленовато-желтые, с показателем преломления как немного большим, так и меньшим, чем у канадского бальзама (1.537). Стекла II типа буро-коричневые, раскристаллизованные в полупросвечивающие агрегаты, которые выглядят под микроскопом как криптокристаллические массы или представляют тесное переплетение игольчатых и таблитчатых микролитов толщиной в 1–2 мкм и длиной до 20–30 мкм. Предположительно, эти микролиты представлены полевым шпатом и пироксеном. Контакты между стеклами обоих типов неровные, но четкие.

Оба типа стекол содержат шлиры лешательерита и обломки диаплектического кварцевого стекла, которые при общей изотропности и низком, порядка 1.46, показателе преломления, различимы между собой по наличию-отсутствию флюидальности. Обычно эти шлиры и обломки являются чистыми, свежими, однако иногда, особенно в стеклах II типа, они замещены тонкозернистыми кварцкристобалитовыми агрегатами с типичной «шаровой» микротекстурой, которая ранее описывалась для стекол Попигайской астроблемы [4], а также известна в импактатах других астроблем

(«ballen structures» по [32]). Шлиры лешательерита часто содержат газовые и различные газовой-жидкие включения; некоторые из таких включений являются достаточно плотными и заполнены жидкой водой, вплоть до 90–95 % объема включения при 20 °С [7]. Иногда в лешательерите наблюдаются струйные и грибообразные внедрения, а также обильные глобулы вмещающего стекла, так что весь агрегат в целом превращается в глобулярный дисперсит [7]. По нашим данным, включающим эксперименты с ударным нагружением частиц металлов разного состава [8], подобные микроструктуры на границе раздела фаз представляют следы неустойчивого течения материала при больших микроградиентах давления, и могут служить одним из петрографических критериев ударного плавления. Подобные же струйно-грибообразные следы неустойчивого течения наблюдаются иногда на границе раздела между стеклами I и II типа. Обломки других минералов, 0.02–0.1 мм величиной, сложены преимущественно кварцем (слабоимпактированные разности, иногда с планарными микроструктурами деформации и скольжения), а также полевым шпатом, демонстрирующим разные стадии ударного метаморфизма (от довольно свежих зерен до диаплектического полевошпатового стекла). Некоторые из обломков диаплектического полевошпатового стекла раскристаллизованы в тонкозернистые агрегаты одновременно погасающих кристаллитов. Изредка встречаются обломки пироксена и циркона. Как и для остальных расплавных пород Попигаиской астроблемы, источником описываемых стекол и включенных в них обломков минералов являются породы архейского кристаллического фундамента мишени [16, 19, 65].

Оба типа стекол содержат глобулы и ксеноморфные выделения аксессуарных рудных минералов. Глобулы очень мелкие, от первых мкм до 15–70 мкм величиной, и сложены, главным образом, зональным троилит-пирротинном, внешняя кайма которого обогащена никелем (до 12.5 вес. %) и кобальтом (до 0.5 вес. %). Реже глобулы сложены пентландитом, самородным железом и рутилом [7]. Ксеноморфные выделения рудных минералов, величиной до 50–70 мкм, сложены рутилом, магнизиальным ильменитом (до 7.4 вес. % MgO) и зональными кристаллами рутила, окаймленными ильменитом.

Диффрактограммы всех исследованных стекол содержат ясно выраженный «горб» аморфной фазы и ясные линии кварца и полевого шпата. Образец П 2154/2 содержит также линии пироксена и следы циркона; образец П 2156/2 – содержит кристобалит и следы магнетита. Кристобалит и магнетит можно считать продук-

тами раскристаллизации стекла; что же касается других минералов, то определить, являются ли они продуктом раскристаллизации или относятся к обломкам минералов из пород мишени, представляется невозможным. Наложённые изменения в исследованных стеклах или отсутствуют, или представлены тонкими пленками вторичных минералов (кварц + хлорит?) вдоль трещин или на стенках некоторых пузырьков.

Стекла кратера Жаманшин. Флюидальные тонкополосчатые стекла кратера Жаманшин представляют закаленные порции импактного расплава, сложенные чередованием нескольких разностей (рис. 1Б). Среди этих разностей, образующих тонкое, до микроскопического, полосчатое чередование, по наблюдениям в шлифах выделяются следующие типы стекол: тип I – чистое прозрачное бледно-желтое стекло; тип II – чистое прозрачное стекло с микропятнистой светло-коричневой окраской; тип III – полупросвечивающее стекло, которое имеет коричневый цвет в проходящем свете и голубой – в отраженном; тип IV – чистое прозрачное стекло с микропятнистой темно-коричневой окраской; тип V – чистое прозрачное стекло с однородной светло-коричневой окраской. По данным предыдущих исследователей [69], стекла III типа являются закаленным композитом двух несмесимых расплавов и представляют матрицу высококремнеземистого стекла, в которой в изобилии рассеяны мельчайшие, диаметром порядка 100 нм, глобулы другого стекла, обогащенного кальцием и фосфором. Помимо описанных разностей, в некоторых образцах исследованного материала встречаются резко очерченные шпирь пористого раскристаллизованного черного или темно-серого стекла (тип VI в нашем исследовании). Это стекло представляет расплавленную импактную породу, возникшую по андезито-базальтовым членам разреза пород фундамента мишени [11]. Оно не принимает участия в образовании характерной тонкослоистой текстуры описываемых образцов и является чуждым для этой текстуры компонентом, который был захвачен расплавом на поздних стадиях процесса образования стекол. Поэтому стекло типа VI мы не изучали.

По наблюдениям в шлифах, распределение описываемых стекол в объеме образцов очень неоднородно. Стекло I присутствует во всех исследованных образцах в количестве от 25–30 до 75 об. %, и именно его переслаивание с другими разностями образует полосчатую текстуру породы. Стекло II, в количестве от 5–10 до 70–75 об. %, также присутствует в большинстве из исследованных образцов (за исключением образцов Ж 2-1, Ж 2-2 и Ж 3-3). Полосы стекла III, в количестве от 10 до 20 об. %, присут-

ствуют в образцах Ж 2-1 и Ж 2-2. Стекло IV, в количестве 25–30 об. %, принимает участие в сложении полосчатости образца Ж 2-3; кроме того, в качестве малой примеси (<2–3 об. %) это стекло встречено в образцах Ж 12 и Ж 13. Полосы стекла V обнаружены в образцах Ж 3-3 (30–35 об. %) и Ж 11 (до 15 об. %). Стекло VI в трех образцах отсутствует (Ж 2-1, Ж 2-2 и Ж 2-3); в остальных 7 образцах оно присутствует как малая примесь (<2–3 об. %), и только в образце Ж 10 слагает до 10–15 % объема породы.

Все образцы содержат «крупные» (до 1–5 мм) и «мелкие» (< 50 мкм) пузырьки. «Крупные» пузырьки обычно флюидально деформированы и редки (2–5 об. %), и только в образце Ж 3-3 их количество достигает 10–30 об. %. Вокруг некоторых «крупных» пузырьков в образцах Ж 1-2, Ж 1-6 и Ж 2-2 наблюдаются следы схлопывания, фиксируемые звездообразным рисунком центростремительного течения вмещающего стекла. «Мелкие» пузырьки, которые почти всегда сферические, распределены в стекле очень неравномерно (от 2–3 об. % в одних участках стекла до 30 об. % и более на других участках, вплоть до образования «пенистых» полос в образцах Ж 2-3, Ж 10 и Ж 13); такие «пенистые» полосы особенно типичны для стекла I. Исследованные стекла также содержат мелкие, порядка 100–300 мкм, шлиры пузыристого лешательерита и обломки диаплектического кварцевого стекла. Последние либо изотропны, либо подверглись начальным стадиям раскристаллизации, переходя в буро-коричневые агрегаты со слабым двупреломлением. Обломки диаплектического кварцевого стекла нередко окружены скоплениями мелких газовых пузырьков. В целом, количество шлir лешательерита и обломков диаплектического кварцевого стекла невелико (~ 2–3 об. %) и только в образцах Ж 2-3 и Ж 3-3 оно достигает 10–15 об. %. Образец Ж 1-2 содержит также редкие мелкие включения пород мишени, сложенные зернами перекристаллизованного кварца, погруженными в криптозернистый буро-коричневый базис.

На диффрактограммах всех стекол наблюдается отчетливо выраженный «горб» аморфной фазы; в образцах Ж 2-2 и Ж 3-3 больше ничего не обнаружено; во всех остальных образцах отмечены следы кварца. Кроме того, иногда присутствуют следы полевого шпата (образец Ж 1-2), кристобалита (образец Ж 2-3) и рутила (образцы Ж 2-3 и Ж 12). За исключением редких следов ожелезнения по трещинам, во всех изученных образцах отсутствуют какие-либо следы изменения.

Тектиты Вьетнама. Тектиты Вьетнама представляют закаленное стекло. В шлифах образцов КТ-1 и КТ-2 оно весьма гомо-

генное, бледно-желтое и содержит единичные сферические пузырьки. Это стекло никак не может быть сопоставлено с теми образцами Попигайской астроблемы и кратера Жаманшин, которые мы изучали. Напротив, в шлифах образцов МНТ-3 и МНТ-4 стекло имеет выраженное тонко-полосчатое сложение и состоит из чередования светлых (бледно-желтое стекло I) и темных (бурокоричневое стекло II) полос (рис. 1Г), весьма напоминая описанные разности попигайских и жаманшинских импактитов. Полосчатость данных тектитов указывает, что по крайней мере на последних стадиях существования расплава доминировало ламинарное течение; следы этого течения определяют как взаимоотношение полос, так и их тонкую внутреннюю структуру; напротив, следы турбулентного течения весьма редки. Обе разности (I и II) стекол в тектитах типа Муонг-Нонг содержат мелкие (0.0n–0.n мм величиной) сферические пузырьки, которые рассеяны в объеме породы в количестве до 7–10 об. %. Однако, в некоторых случаях эти пузырьки концентрируются в макроскопически видимые пенные полосы. Стекла всех образцов содержат единичные мелкие шпирь пузырьчатого лешательерита. Все тектиты нашей коллекции исключительно свежие и совершенно аморфны по рентгеноструктурным данным. В целом, наши образцы похожи на стекла австрало-азиатских тектитов, которые описаны К. Коберлом [48] и многими другими авторами.

Валовый химический состав стекол

Флюидальные тонкополосчатые стекла Попигайской астроблемы. Валовые химические составы образцов Попигайской астроблемы, сложенных тонкополосчатыми стеклами, весьма близки между собой (табл. 2) и аналогичны химическим составам других расплавных импактных пород этого кратера, опубликованным в работах В. Л. Масайтиса [16, 19], а также С. А. Вишневого и А. Монтанари [65]. Как уже отмечалось ранее [16, 19], средние химические составы расплавных импактитов Попигайской астроблемы соответствуют таковым для архейских гнейсов кристаллического фундамента мишени, из которых эти импактиты образовались. Однако, при сравнении с родительскими породами, расплавные импактиты астроблемы, а также стекла, исследованные в настоящей работе, отличаются более низкой степенью окисления железа ($Fe_2O_3/FeO = 0.19 \div 0.58$) и соотношением щелочей ($Na_2O/K_2O = 0.69 \div 0.85$). Этот факт может быть объяснен спецификой ударного плавления во время Попигайского импактного события.

Химические составы стекол I и II типов, которые слагают полосчатую текстуру исследованных образцов, приведены в табл. 3.

Как уже говорилось выше, сравнение с результатами «влажного» химического анализа валового состава образцов (табл. 2), выявило заниженные (в среднем на величину порядка 2.8 вес. %) содержания кремнезема, что во многом определило низкие суммы анализов в табл. 3. Однако, с учетом наличия летучих (см. результаты газового хроматографического анализа этих же образцов), общие суммы анализов могут быть повышены до значений 98.3–99.2 вес. % (табл. 3). Отметим также, что химические составы обсуждаемых стекол, полученные обоими методами, выявляют большую однородность образцов и хорошее сходство по всем, кроме кремнезема, компонентам. Поэтому мы считаем, что сравнение стекол I и II типов на основе наших микронзондовых данных представляется достаточно корректным, о чем уже говорилось выше. Как показывают табл. 3 и рис. 3, оба типа стекол по валовому химическому составу весьма близки между собой, а также близки к валовому химическому составу всей породы в целом, приведенному в табл. 2. Несколько более высокая величина дисперсии содержания компонент в стеклах II типа объясняется локальными эффектами кристаллизации. Геохимическое сходство обоих типов стекол, включая близость в содержании таких элементов-хромофоров как Fe и Mn, показывает, что тонкополосчатая текстура исследованных образцов не связана с различиями состава между этими стеклами.

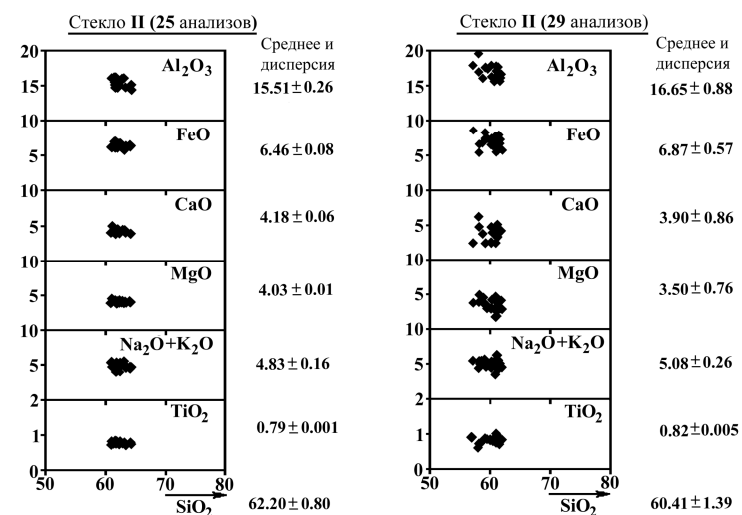


Рис. 3. Содержания окислов главных петрогенных элементов (в вес. %) в тонкополосчатых образцах Попигайского кратера для стекол I и II типа. Микронзондовый анализ.

Флюидальные тонкополосчатые стекла кратера Жаманшин

Валовые химические составы исследованных образцов кратера Жаманшин (табл. 2) довольно близки к таковым, которые опубликованы для подобного типа стекол [11]. Они определены «влажным» методом и в целом характеризуются хорошими контрольными суммами. Что касается микрозондовых определений химического состава индивидуальных полос стекла, то контрольные суммы этих анализов довольно низкие, от 96.40 вес. % до 98.94 вес. % (табл. 4), и не могут быть улучшены за счет содержания летучих компонент (данные хроматографического анализа). Как и в случае с попигайскими образцами, мы предполагаем, что дефицит суммы микрозондовых анализов связан, главным образом, с систематической ошибкой в определении кремнезема и, возможно, окиси натрия, если руководствоваться результатами валового химического состава образцов, полученными «влажным» методом (табл. 2). Однако, в связи с большой неоднородностью строения образцов, прямое сравнение микрозондовых анализов стекол с результатами табл. 2 представляется нецелесообразным. Так как микрозондовые исследования были выполнены стандартным способом на одном и том же приборе, мы считаем, что систематическая погрешность этого анализа малозначимо повлияла на результаты нашего сравнения выделенных типов стекол кратера Жаманшин.

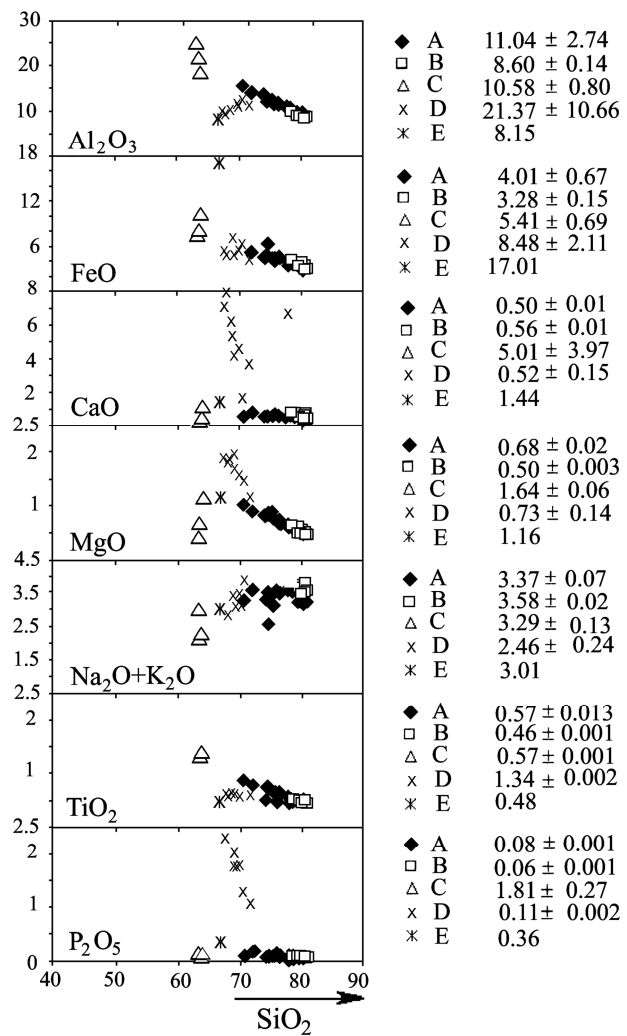
По валовому химическому составу различных стекол, слагающих полосчатую текстуру исследованных образцов (табл. 4 и рис. 4) отмечаются следующие особенности этих пород: 1) как и для попигайских пород, полосчатая текстура образцов Ж 1-2, Ж 1-6, Ж 10, Ж 12 и Ж 13 (стекла I и II петрографических типов) образована тонкослоистым чередованием химически близких разновидностей; при этом, петрографические типы I и II стекол мы выделяем, соответственно, в геохимические типы А и В; по особенностям своей петрохимии эти стекла образуют сообщество с хорошо выраженным трендом (рис. 4), который, вероятно, определяет близкие фациальные условия образования их родительских субстратов; тонкополосчатая текстура данных образцов, выраженная окраской, не является результатом больших колебаний в содержании компонентов, особенно таких элементов-хромофоров как Fe и Mn; более того, в бледно-желтом стекле I количество Fe, Mg и Ti даже выше, чем в светло-коричневом стекле II; 2) в остальных образцах тонкополосчатая текстура обусловлена чередованием разных по составу стекол петрографических типов III-V, которые присутствуют в этих образцах наряду со стеклами I типа (или стеклами I+II типов в образце Ж 11); стекла III-V типов обладают выраженными

Таблица 4

Валовый химический состав (вес. %) различных типов тонко-полосчатых импактных стекол кратера Жаманшин, определенный микронзондовым анализом (приведены средние значения нескольких индивидуальных анализов по каждому типу стекла)

№ образца	Тип стекла *		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
Ж 1-2	I (4)	A	77.63	0.55	10.18	3.78	0.51	0.62	0.07	0.46	3.12	0.06	96.98
	II (2)	B	79.38	0.48	8.69	3.56	0.70	0.56	0.08	0.60	3.07	0.06	97.18
Ж 1-6	I (3)	A	73.44	0.73	13.39	4.88	0.54	0.89	0.11	0.37	2.98	0.09	97.42
	II (2)	B	79.51	0.47	8.95	3.58	0.71	0.53	0.10	0.57	3.19	0.06	97.67
Ж 2-1	I (2)	A	78.10	0.44	10.44	3.40	0.50	0.59	0.06	0.42	3.15	0.10	97.20
	III (4)	C	68.92	0.57	10.63	5.54	4.99	1.67	0.08	0.82	2.49	1.81	97.52
Ж 2-2	I (2)	A	75.59	0.56	11.32	4.06	0.62	0.74	0.09	0.28	3.03	0.11	96.40
	III (4)	C	69.91	0.58	10.53	5.28	5.04	1.60	0.06	0.78	2.39	1.83	97.70
Ж 2-3	I (1)	A	71.97	0.76	13.97	5.00	0.78	0.87	0.12	0.38	3.18	0.16	97.19
	IV(1)	E	66.49	0.48	8.15	17.01	1.44	1.16	0.36	0.72	2.29	0.36	98.46
Ж 3-3	I (1)	A	74.45	0.76	11.83	6.13	0.46	0.86	0.11	0.28	2.26	0.06	97.20
	V (1)	D	63.76	1.39	18.14	10.12	0.97	1.14	0.13	0.44	1.80	0.13	98.02
Ж 10	I (2)	A	79.20	0.49	9.24	3.39	0.42	0.55	0.06	0.35	3.02	0.07	96.79
	II (2)	B	80.24	0.45	8.56	2.96	0.43	0.46	0.05	0.46	3.09	0.06	96.76
Ж 11	I (3)	A	78.23	0.55	10.30	3.67	0.41	0.57	0.07	0.37	3.02	0.07	97.26
	II (1)	B	80.49	0.49	8.38	3.07	0.46	0.44	0.06	0.44	3.06	0.05	96.94
	V (2)	D	63.39	1.31	22.98	7.67	0.30	0.53	0.09	0.62	1.95	0.10	98.94
Ж 12	I (2)	A	77.09	0.51	11.25	3.53	0.37	0.61	0.06	0.32	2.88	0.06	96.68
	II (2)	B	80.26	0.46	8.47	3.41	0.57	0.52	0.06	0.41	3.00	0.05	97.21
Ж 13	I (2)	A	77.52	0.56	10.42	3.84	0.56	0.65	0.09	0.37	2.97	0.06	97.04
	II (2)	B	80.19	0.46	8.48	3.01	0.47	0.48	0.06	0.53	3.02	0.06	96.78

Примечание: * – слева в этой колонке показаны петрографические типы стекла I – V (см. текст) и количество индивидуальных анализов по каждому типу стекла (в скобках); справа показаны геохимические типы стекла A – E (см. текст); «FeO» = FeO + Fe₂O₃.



◆ A 76.68 ± 6.86 □ B 79.79 ± 0.57 △ C 69.27 ± 1.76
 × D 63.51 ± 0.05 * E 66.70

Рис. 4. Содержания окислов главных петрогенных элементов (в вес. %) в тонкополосчатых образцах кратера Жаманшин для стекол петрохимических типов А – Е. Микронзондовый анализ.

индивидуальными особенностями валового химического состава и образуют собственные поля на рис. 4; эти петрографические типы III-V мы выделяем, соответственно, в геохимические типы С, D и E. Геохимический тип С (табл. 4), который соответствует нашему петрографическому типу III и «голубым жаманшинитам» предыдущих авторов [47, 69], имеет четко выраженную фосфатно-кальциевую специализацию, ранее установленную этими авторами.

Однородные и тонкополосчатые стекла тектитов Вьетнама. Валовые химические составы вьетнамских тектитов, определенные «влажным» методом, приводятся в табл. 2 и близки к результатам, опубликованным для этих стекол ранее [11, 48]. Валовые химические составы этих стекол, определенные с помощью микрозондового анализа, приведены в табл. 5 и характеризуются недостатком в 1.2–2.8 вес. % в контрольных суммах, что мы связываем с систематической ошибкой определений, отмеченной выше. Тем не менее, как уже отмечалось выше, стандартная аналитическая процедура при стабильном режиме работы прибора позволяет считать, что относительные пропорции в содержании большинства компонентов не нарушены, и для целей сравнения исследованных стекол между собой указанная ошибка не существенна. Последнее подтверждается также и тем, что тонкие различия состава между светлыми и темными полосами стекла в тектитах типа Муонг-Нонг (см. ниже), выявленные как в нашем исследовании, так и предыдущими авторами [48], аналогичны.

Каплеобразные тектиты (образцы КТ-1 и КТ-2) практически аналогичны по составу между собой, однако петрохимически отличны от тектитов типа Муонг-Нонг (образцы МНТ-3 и МНТ-4). Что касается строения последних, то светлые (тип I) и темные (тип II) стекла, слагающие тонкополосчатую текстуру этих тектитов, характеризуются довольно однородным валовым химическим составом и довольно близки друг другу (табл. 5 и рис. 5). Следует, однако, отметить, что между светлыми и темными полосами стекла существуют небольшие различия в содержании главных химических компонентов, хотя эти различия менее выражены, чем ранее опубликованные для этих тектитов [37, 48]. Тем не менее, трудно представить, чтобы такие незначительные различия в валовом составе, особенно, в содержании таких элементов-хромофоров как Fe и Mn, могли вызвать столь заметный контраст в окраске стекол I и II типа. Более того, как по нашим данным (табл. 6), так и по данным предыдущих авторов [48], содержания главных элементов-хромофоров в светлых стеклах почти всегда выше (за редким исключением), чем в темных стеклах. Таким образом, темная окраска

Таблица 5

Валовый химический состав (вес. %) вьетнамских тектитов (каплеобразный тип и тип Муонг-Нонг),
определенный микрозондовым анализом
(средние значения нескольких индивидуальных анализов по каждому типу стекла)

№ образца	КТ-1	КТ-2	МНТ-3		МНТ-4		Тектиты типа Муонг-Нонг по Koeberl (1992)*	
			Светлое стекло, тип I (15)	Темное стекло, тип II (15)	Светлое стекло, тип I (3)	Темное стекло, тип II (3)	Светлое стекло***	Темное стекло***
SiO ₂	72.87	72.71	75.01	76.73	73.83	77.09	76.3	81.3
TiO ₂	0.73	0.75	0.70	0.68	0.75	0.66	0.75	0.55
Al ₂ O ₃	11.84	12.13	11.01	9.88	11.73	10.81	12.26	9.28
FeO	4.78	4.52	3.81	3.60	4.53	3.56	4.38	3.33
CaO	1.84	1.84	1.45	1.62	1.78	1.41	1.08	1.04
MgO	2.62	2.28	1.60	1.59	2.19	1.62	1.68	1.23
MnO	0.09	0.09	0.09	0.07	0.10	0.07	0.10	0.09
Na ₂ O	0.88	0.91	0.88	0.95	0.97	0.79	0.99	0.93
K ₂ O	2.45	2.65	2.54	2.53	2.56	2.71	2.51	2.40
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	н.а.	н.а.
Сумма	98.14	97.92	97.16	97.71	98.50	98.79	100.05	100.15

Примечание: * – образец № 8302, таблица 5с в указанной работе; ** – петрографические типы стекол, см. в тексте; *** – среднее нескольких индивидуальных анализов, количество которых не указано; «FeO» = FeO + Fe₂O₃; «н.а.» – анализ не выполнялся.

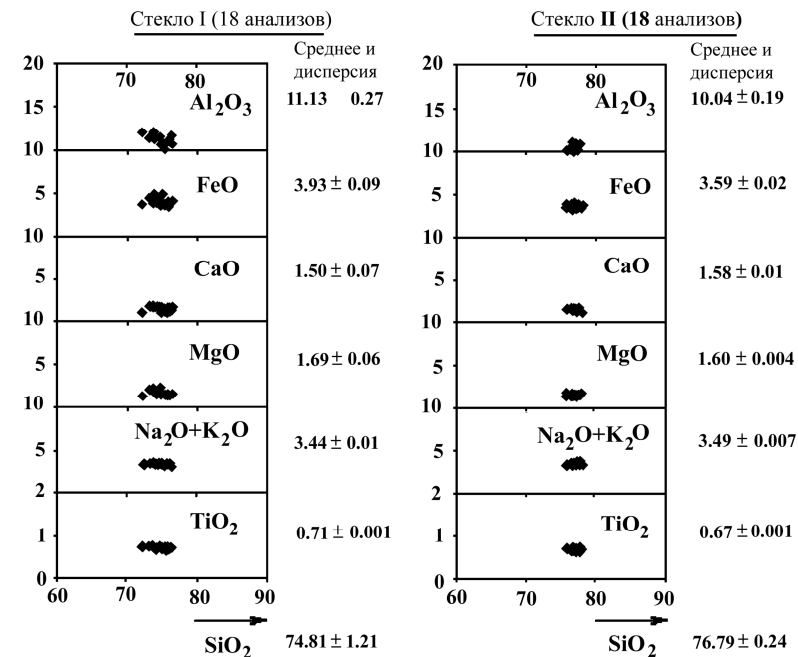


Рис. 5. Содержания окислов главных петрогенных элементов (в вес. %) в тонкополосчатых образцах тектитов типа Муонг-Нонг из Вьетнама для светлых (тип I) и темных (тип II) стекол. Микронзондовый анализ.

полос стекол в тектитах типа Муонг-Нонг не связана с содержанием элементов-хромофоров. Здесь же можно добавить, что некоторые авторы [68] вообще не нашли какой-либо разницы в химических составах светлых и темных полос стекла в указанных тектитах.

Содержания воды и газов в стеклах

Содержания воды и газов в стеклах, определенные газовым хроматографическим анализом, приводятся в табл. 6.

В стеклах Попигайской астроблемы обнаружены значительные количества воды; при этом нераскристаллизованные стекла I типа существенно беднее водой, чем раскристаллизованные стекла II типа (табл. 6, рис. 6). В последних содержание воды достигает 2.246 вес. % (образец II 2156/2). Этот результат находится в хорошем соответствии с ранее полученными данными для других расплавленных импактных пород Попигайской астроблемы [63, 65], а именно:

Таблица 6

Флюидно-газовый состав (вес. %) различных тонкополосчатых импактных стекол, определенный методом газовой хроматографии

№ образца	Тип стекла*	H ₂ O	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	Группа CH ₄ -газов	O ₂
П 2154/1а	I	0.226	0.0076	0.002	0.0005	–	–	–
	II	0.525	0.0105	0.0028	0.0013	–	–	–
П 2154/2	I	0.641	0.0118	0.009	0.002	–	–	–
	II	1.896	0.0264	0.0098	0.005	–	–	–
П 2154/2а	I	0.828	0.022	0.0035	0.008	–	0.0006	–
	II	1.743	0.0168	0.0064	0.0064	–	0.0004	–
П 2154/3а	I	0.476	0.019	0.0024	0.0016	–	0.0001	–
	II	2.062	0.098	0.0118	0.0088	–	0.0011	–
П 2156/2	I	0.897	0.149	0.0092	0.0069	–	0.001	–
	II	2.246	0.345	0.0228	0.0112	–	0.0021	–
Ж 1-2	I	0.018	0.0034	0.0009	–	–	–	–
	II	0.004	0.0034	0.0007	–	–	–	–
Ж 1-6	I	0.018	0.006	0.0024	–	–	–	–
	II	0.002	0.015	0.0024	сл.	–	–	–
Ж 2-1	I	0.034	0.0058	0.0017	–	–	–	–
	III	0.053	0.0077	0.0009	–	–	–	–
Ж 2-2	I	0.013	0.0036	0.001	–	–	–	–
	III	0.059	0.007	0.0017	–	–	–	–
Ж 2-3	I	0.006	0.006	0.0015	–	–	–	–
	IV	0.027	0.01	0.0036	сл.	–	сл.	–
Ж 3-3	I	0.001	0.0021	0.0006	–	–	–	–
	V	сл.	0.0053	0.0007	–	–	–	–
Ж 10	I	0.019	0.009	0.0022	–	–	–	–
	II	0.003	0.0036	0.0006	–	–	–	–
Ж 11	I	0.001	0.005	0.002	–	–	–	–
	II+V	0.001	0.0064	0.0016	–	–	–	–
Ж 12	I	0.004	0.004	0.0015	сл.	–	–	–
	II	0.004	0.010	0.0028	–	–	–	–
Ж 13	I	0.009	0.022	0.0046	сл.	–	сл.	–
	II	0.009	0.022	0.0039	0.0002	–	0.0001	–
КТ 1	+	0.016	0.0024	0.001	–	–	–	–
КТ 2	+	0.0008	0.0024	0.0014	–	–	–	–
МНТ 3	+	0.015	0.0176	0.0036	–	–	–	–
МНТ 4	+	0.016	0.0069	0.0011	–	–	–	–

Примечание: см. таблицу 1 для идентификации образцов; * – петрографические типы стекол (см. текст); + – валовый анализ образца; «сл.» – компонент обнаружен в следовых количествах; «–» – компонент не обнаружен.

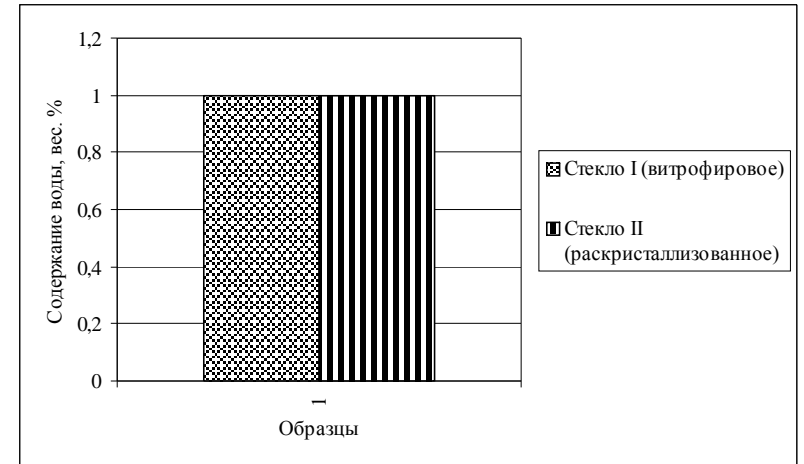


Рис. 6. Содержание воды (в вес. %) для стекол I и II типа в тонкополосчатых образцах Попигайского кратера. Газовый хроматографический анализ.

1) по содержанию воды все эти породы подразделяются на «влажные» и «сухие» разности, что объясняется унаследованным влиянием архейских кристаллических пород мишени; 2) во «влажных» импактитах (среднее содержание H_2O в этих породах составило 2.23 вес. %, а максимальные содержания – до 3.2 вес. %) эта вода имела важное значение в процессах раскристаллизации стекла. По широко распространенному мнению [30, 50] импактные стекла астроблем считаются очень бедными водой (0.02–0.06 вес. %). Данные настоящей работы и наши предыдущие исследования [7, 63, 65] с этим мнением не согласуются. В частности, даже в шлирах свежего лешательерита из зювитов обнаружены обильные сингенетические плотные водные включения [7]. Мы предполагаем, что выявленное разногласие указывает на ограниченную миграцию воды из импактных расплавов в гигантских астроблемах, по сравнению с ее дегазацией из расплавов в лабораторных экспериментах, пунктах ядерных взрывов, мелких кратерах, а тем более из мелких капель и микрочастиц стекла в тектитных полях рассеяния. Кроме воды, в образцах тонкополосчатых попигайских стекол обнаружены CO_2 (0.0076–0.345 вес. %), CO (0.002–0.0228 вес. %), H_2 (0.0005–0.0112 вес. %) и газы группы CH_4 (0.0006–0.0046 вес. %); содержания этих газов в раскристаллизованном стекле II в целом выше, чем в стекле I (табл. 6).

В стеклах кратера Жаманшин содержание воды очень низкое (0.001–0.059 вес. %) и характеризуется очень неоднородным

распределением, однако при этом не обнаруживает связи с петрографическими типами стекол (табл. 6). Таким образом, роль воды в образовании полосчатой текстуры исследованных образцов исключается. Близкие содержания воды (0.008–0.063 вес. %) были установлены в аналогичных стеклах кратера другими исследователями [30, 50], проводивших анализ ИК-спектрометрическим методом.

Содержание воды в исследованных вьетнамских тектитах очень низкое (0.0008–0.016 вес. %), и в одном случае ее количество в каплеобразных тектитах (образец КТ-1) такого же порядка, как и в тектитах типа Муонг-Нонг (табл. 6). По низкому содержанию воды исследованные тектиты типа Муонг-Нонг проявляют еще одно сходство с тонкополосчатыми стеклами кратера Жаманшин. Близкие содержания воды (0.009–0.03 вес. %), были получены для тектитов типа Муонг-Нонг другими авторами [50]. По техническим причинам мы не проанализировали распределение воды между светлыми и темными полосами стекла данных тектитов, но по данным других авторов [30, 50], между этими стеклами ясного различия в этом отношении нет. Кроме воды, в исследованных тектитах были установлены низкие содержания CO_2 (0.0024–0.0176 вес. %) и CO (0.001–0.0036 вес. %).

Следует особо отметить, что во всех исследованных тонкополосчатых стеклах не обнаружены азот и свободный кислород.

ЭПР и Мессбауэровские исследования

Результаты электронных парамагнитных исследований стекол Попигайской астроблемы и кратера Жаманшин приведены в табл. 7.

В попигайских образцах ион Fe^{3+} присутствует в обоих типах стекол как в форме изоморфной структурной примеси, атомарно-рассеянной в стекле (о чем свидетельствует изотропная симметричная линия $g = 4.3$), так и в качестве компонента минеральных фаз, содержащихся в породе (о чем свидетельствуют взаимодействующие ионы, регистрируемые интенсивной широкой линией $g = 2.0$). В последнем случае, главным концентратором иона Fe^{3+} является магнетит. Нарушение симметрии для линии $g = 4.3$ указывает на то, что атомарно-рассеянные ионы Fe^{3+} , занимают в стекле несколько неэквивалентных структурных позиций. При сравнении обоих типов стекол обнаруживается, что нераскристаллизованные разности (тип I) содержат в 2–10 раз меньшее количество иона Fe^{3+} в минеральной фазе, чем раскристаллизованные стекла (тип II).

Близкая, но в целом, более контрастная ситуация в распределении иона Fe^{3+} наблюдается в образцах кратера Жаманшин (рис. 7), а именно: 1) резко доминирующая часть иона Fe^{3+} сконцен-

Таблица 7

Содержание иона Fe^{+3} (в относительных единицах, $I^* \Delta H^2$) в тонкополосчатых импактных стеклах Попигайской астроблемы и кратера Жаманшин по данным электронно-парамагнитного исследования

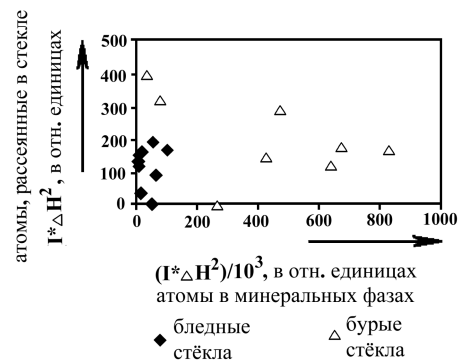
№ образца	Fe^{+3} непосредственно в стекле (g = 4.3)		Fe^{+3} в минеральных фазах, включенных в стекло (g = 2.0)	
	Стекло I	Другие стекла	Стекло I	Другие стекла
П 2154/3а*	101	сл. (II)	150800	1706900 (II)
П 2156/2*	73	56 (II)	364500	748800 (II)
Ж 1-6	169	169 (II)	101200	826800 (II)
Ж 2-1	155	324 (III)	9300	77900 (III)
Ж 2-2	164	397 (III)	16000	33400 (III)
Ж 2-3	93	сл. (IV)	61500	263200 (IV)
Ж 3-3	35	н.а. (V)	13500	н.а. (V)
Ж 10	сл.	118 (II)	50600	637900 (II)
Ж 11	195	177 (II+V)	53500	671900 (II+V)
Ж 12	135	295 (II)	7100	467800 (II)
Ж 13*	121	148 (II)	7200	425200 (II)

Примечание: см. таблицу 1 для идентификации образцов; цифры в скобках обозначают петрографический тип стекла (см. текст); «н.а.» – анализ не выполнялся; «сл.» – компонент обнаружен в следовых количествах; * – в стекле отмечено присутствие иона Mn^{+2} .

трирована в минеральной фазе, а не атомарно-рассеяна в стекле; 2) в буро-окрашенных стеклах II–V типов содержание иона Fe^{3+} минеральной фазы в 2–66 раз выше, чем в светло-окрашенных стеклах типа I. Природа минеральной фазы в этих стеклах нами не установлена.

Таким образом, как попигайские образцы, так и образцы кратера Жаманшин характеризуются тем, что их раскристаллизованные (или буро-окрашенные) стекла отличаются от нераскристаллизованных (светло-окрашенных) стекол повышенным содержанием иона Fe^{3+} . Этот ион является индикатором окислительно-восстановительных условий породообразования и является одним из главных хромофоров, обеспечивающих окраску стекла. В частности, это согласуется с данными [27] о том, что бурые тона окраски кислых стекол связаны с присутствием иона Fe^{3+} в четверной координации.

Рис. 7. Содержание иона трехвалентного железа Fe^{3+} (в относительных единицах) для стекол I типа (бледное) и II-V типов (бурые) в тонкопослабчатых образцах кратера Жаманшин. Электронно-парамагнитный анализ.



Мессбауэровские исследования, результаты которых приведены в табл. 8, были выполнены с целью изучения степени окисления железа и координационного состояния иона Fe^{3+} в стеклах Попигайской астроблемы, кратера Жаманшин и тектитов. Как и в работе [13], ионы Fe^{3+} определялись на основе наименьших магнитуд изомерного смещения δ и квадрупольного расщепления Δ . Структурная позиция иона Fe^{3+} определялась на основе изомерного смещения (0.29–0.46 мм/с для тетраэдрической позиции и >0.46 мм/с для октаэдрической позиции). В соответствии с этим, все ионы Fe^{3+} присутствуют в исследованных стеклах в тетраэдрической позиции, а количество их низкое (в пределах 2–7 % от общего содержания железа в стекле, табл. 8). Соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} , которое обнаружено в наших образцах тектитов (0.02 для образца КТ-1 и 0.079 для образцов МНТ-3 и МНТ-4, табл. 8) согласуется с ранее опубликованными данными для этих стекол о том, что железо в них находится преимущественно в двухвалентном состоянии ($Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0.14 \pm 0.6$ для каплевидных форм, и 0.071–0.255 для тектитов типа Муонг-Нонг [48]).

Ионы Fe^{2+} находятся в октаэдрической позиции и занимают три неэквивалентных структурных состояния I, II и III (табл. 8). Наличие таких состояний указывает на высокий уровень разупорядоченности атомов кислорода, окружающих эти ионы. Эта разупорядоченность связана с быстрой закалкой изучавшихся стекол от высоких температур. Согласно данным [13] по магнитудам изомерного смещения и квадрупольного расщепления, ионы Fe^{2+} , которые занимают структурное состояние II, находятся в типичной октаэдрической координации, в то время как ионы Fe^{2+} в структурных состояниях I и II находятся в сильно искаженной октаэдрической позиции. В соответствии с этим можно предположить, что стекла с наибольшими содержаниями иона Fe^{2+} в структурном состоянии II (образцы П 2154/2, П 2154/3а, Ж 11, Ж 12, Ж 13,

Таблица 8

Относительные пропорции ионов Fe^{+2} и Fe^{+3} (в пересчете на 100 % общего содержания ионов Fe в стекле), а также структурные позиции иона Fe^{+2} в тонкопосчатых импактных стеклах Попигайской астроблемы, кратера Жаманшин и вьетнамских тектитов по данным Мессбауэровского анализа

№ образца	Fe^{+2}			Fe^{+3}	$\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$
	Fe^{+2} (I)	Fe^{+2} (II)	Fe^{+2} (III)		
П 2154/2	48.1	38.3	9.6	4.0	0.042
П 2154/2a	43.1	13.8	38.9	4.2	0.044
П 2154/3a	54.4	21.6	19.7	4.3	0.045
Ж 1-2	43.7	27.2	24.7	4.4	0.046
Ж 2-1	40.3	23.1	30.4	6.2	0.066
Ж 3-3	45.5	25.6	26.8	2.1	0.021
Ж 10	40.2	25.3	31.9	2.6	0.027
Ж 11	46.2	30.9	19.1	3.8	0.040
Ж 12	45.3	30.5	19.1	5.1	0.054
Ж 13	42.4	39.6	12.4	5.6	0.059
КТ-1	49.6	12.1	36.3	2.0	0.020
МНТ-3	45.6	26.9	20.2	7.3	0.079
МНТ-4	45.1	30.0	17.6	7.3	0.079

Примечание: см. таблицу 1 для идентификации образцов.

МНТ-3 и МНТ-4) образовались при более низких скоростях закалки, чем стекла с повышенными содержаниями иона Fe^{2+} в структурном состоянии III (образцы П 2154/2a, Ж 1-2, Ж 2-1, Ж 3-3, Ж 10 и КТ-1). Относительно тектитов мы должны отметить, что по вопросу о состоянии иона Fe^{2+} здесь все еще нет согласованного мнения. По [13], все двухвалентное железо находится в этих стеклах в октаэдрической координации; другие авторы [34] считают, что небольшая часть Fe^{2+} находится в тектитах в тетраэдрической координации; по последним данным (G. Pratesi, личное сообщение, 2001), распределение иона Fe^{2+} в тектитах промежуточное, между четверной и пятерной координацией [59], и среднее координационное число для этого иона приближается к 4.5.

Обсуждение результатов

Тонкопосчатые стекла Попигайской астроблемы. Исследованные образцы Попигайской астроблемы, сложенные чередованием свежих (тип I) и раскристаллизованных (тип II) стекол, являются довольно парадоксальными в петрологическом отноше-

нии образования, поскольку обладают четкой полосчатой текстурой при весьма близком, если не аналогичном, валовом составе слагающих эту текстуру полос (табл. 3, рис. 3). Более высокая степень дисперсии состава для стекол II типа может объясняться эффектами раскристаллизации их вещества. В качестве причины неравномерной раскристаллизации однообразного по составу материала можно было бы предположить разную температуру тонкоперемешанных, но не гомогенизированных исходных расплавов. Эффект неоднородной раскристаллизации подобных смесей известен для вулканических стекол [27]. В рамках такой интерпретации, из порций закаленного высокотемпературного расплава возникли полосы свежего стекла, а из низкотемпературных – полосы раскристаллизованного стекла.

Однако, ясное различие между описываемыми стеклами по содержанию воды (стекла I типа в 2.1 – 4.33 раза беднее H_2O , чем стекла II типа, табл. 6, рис. 6) позволяет считать, что именно вода была причиной такой неоднородной раскристаллизации. Известно [27, 57], что вода является одним из наиболее эффективных агентов, вызывающих раскристаллизацию стекол. Следуя такой интерпретации, попигайские тонкополосчатые стекла являются смесями «сухих» и «влажных» апогнейсовых импактных расплавов. Можно ли считать, что такое микрогетерогенное распределение воды было унаследовано из конкретного, весьма локального родительского источника в гнейсах? Монотонный валовый состав тагамитов и других расплавных пород Попигайской астроблемы неоднократно подчеркивался разными авторами [16, 19, 65] и однозначно указывает, что при ударном плавлении все структурно-текстурные особенности исходных гнейсов были уничтожены. Соответственно, были гомогенизированы все микро- и макро-неоднородности первичного распределения воды в локальных объемах этих гнейсов, такие как трещинно-поровые системы исходной породы и включения водосодержащих минералов. Поэтому мы рассматриваем описываемые полосчатые стекла как смеси «сухих» и «влажных» импактных расплавов, доставленных из пространственно-разных источников в мишени [63, 66]. Тонкая структура этих расплавных смесей была затем сохранена закалкой во время полета. В пользу такой модели образования тонкополосчатых стекол, предполагающей смещение и аккрецию капель или струй «сухих» и «влажных» апогнейсовых импактных расплавов (вариант А) говорят данные о том, что все сообщество расплавных импактитов Попигайской астроблемы отчетливо разделяется на «сухие» (тип I) и «влажные» (тип II) разновидности, которые сложным образом чередуют-

ся между собой с пространстве [63, 65]. Это различие прямо коррелирует со степенью раскристаллизации этих импактитов и характерно для широкого диапазона размеров тел их пород, начиная от мегамасштабного чередования крупных тел тагамитов I и II типа и заканчивая макро- и микроскопическим переслаиванием стекол I и II типа в обнажениях донных импактных брекчий и в закаленных комках импактного стекла из зювитов.

Обилие обломков мезозойских пород и присутствие «аккреционных» лапиллей в зювитах далдынской формации астроблемы [6, 65] допускает и другой вариант образования описываемых тонкополосчатых стекол. «Аккреционные» лапилли по [42] являются свидетельством наличия больших капель конденсированной воды во взрывном облаке; эта вода поступила из пористых влагонасыщенных осадочных пород мишени; во время полета на этих каплях происходила аккреция тонкоизмельченного материала мишени. Часть импактного расплава могла захватывать такую воду, а затем смешиваться в полете с каплями «сухих» расплавов, образуя тонкополосчатые стекла (вариант Б нашей модели).

С обоими вариантами предложенной модели согласуется неоднородное содержание иона Fe^{3+} минеральной фазы, наблюдаемое в описываемых стеклах. В раскристаллизованных расплавах оно в 2–10 раз выше, чем в нераскристаллизованных стеклах. Это можно объяснить окислением железа под действием воды в высокотемпературном импактном расплаве.

Оба варианта А и Б предполагают очень интенсивное взаимодействие (столкновения струй, перемешивание, аккреция) в полете высокотемпературного тонкодиспергированного расплавленного материала, который был доставлен в зону контакта из пространственно разных источников в мишени. Такое взаимодействие требует особого механизма, что в равной степени необходимо и для образования огромных масс зювитовых формаций Попигайской астроблемы, обладающих особой спецификой. Обычные представления об образовании зювитов рассматривают их как продукт простого баллистического разлета, смешения и выпадения материала при строго последовательном и согласном потоке струй кратерообразующих выбросов во взрывном облаке (как это предполагается, например, широко распространенной Z-моделью кратерообразования по [55]). В качестве примера здесь можно привести модель образования зювитов кратера Рис по [58]. Однако, для зювитов Попигайской астроблемы такая интерпретация не приемлема. Об этом говорит целый ряд особенностей этих пород, таких как массовое смешение продуктов зоны импактного плавления со слабо-

импактированным материалом из краевой зоны кратера; наличие зювитовых мегабрекчий; отсутствие «обратной стратиграфии» в колонне отложений; мнимо-вторичные взаимоотношения разных зювитов и другие парадоксы (см. [6, 65]).

Нами [6, 65] предложена иная модель динамической структуры Попигайского взрывного облака, которая позволяет объяснить наблюдаемые парадоксы геологии и петрографии зювитовых формаций. Согласно нашей модели, в этом облаке существовала упорядоченная система сталкивающихся струй, выброшенных из разных зон ударного метаморфизма мишени. Данная модель базируется на представлении о приповерхностном отставании фронта слабых ударных волн в средней и краевой зонах растущего кратера. В результате, материал из этих зон выбрасывался по субвертикальным траекториям и вступал в столкновение с расплавленными и испаренными продуктами из внутренней области кратера, которые двигались по более пологим траекториям. Именно такая модель экскавации, а не простой баллистический разлет, позволяет объяснить те сложные взаимодействия (вихревые процессы, столкновения струй, перемешивание, аккреция) высокотемпературного тонкодиспергированного расплавленного материала из пространственно разных источников в мишени, которые необходимы для образования тонкополосчатых стекол по вариантам А и Б. Векторно-скоростной анализ движения струй материала, выброшенного во взрывное облако из разных зон импактирования, указывает на широкое распространение процессов вторичного ударного взаимодействия при столкновениях этих струй в полете [6, 65]. Поэтому можно предположить, что наряду со смесительно-аккреционными механизмами, образование тонкодиспергированных смесей разных импактных расплавов происходило с участием процессов неустойчивого течения на границе раздела порций расплава, вошедших в коллизионный контакт и подвергнутых повторному ударному нагружению. Следы такого течения известны при экспериментальном ударном сжатии композитов разных металлов, а также пользуются широким распространением на границе раздела стекол разного состава в импактных брекчиях Попигайской астроблемы [8] (рис. 8). Особенно хорошо такие следы сохраняются на контакте шликер лешательерита, которые быстрее всего подвергаются закалке, и смешанных стекол. Здесь можно видеть как начальные этапы образования смесей (развитие каймы внедрений и глобулярных структур на границе шликера), так и завершающие этапы процесса, когда такой шликер разрушается и превращается в бирасплавный диспергит с глобулярной структурой (рис. 9).

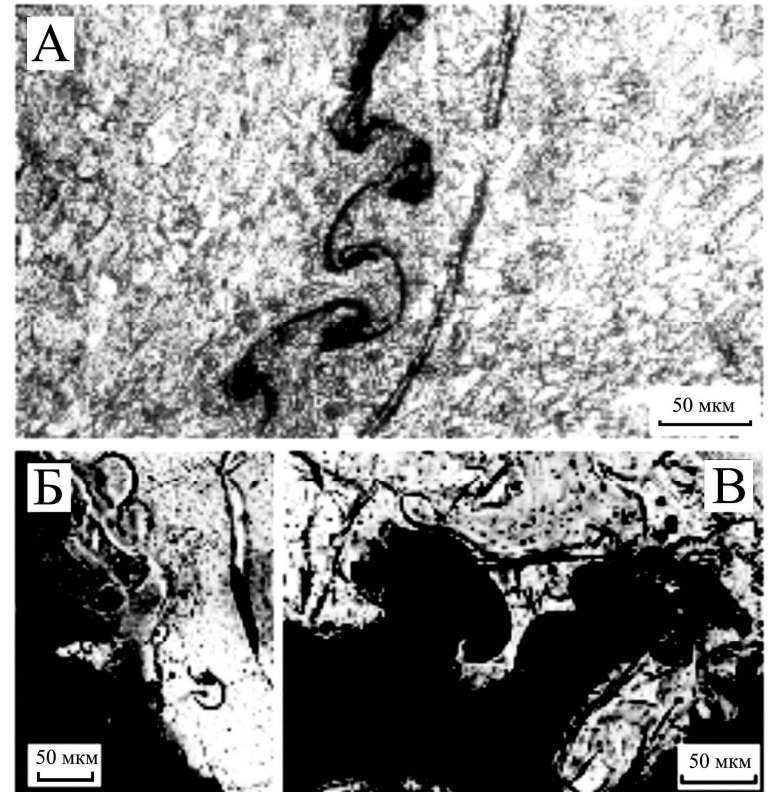


Рис. 8. Структуры неустойчивого течения на границе раздела фаз в ударно-нагруженном состоянии (по [8]):

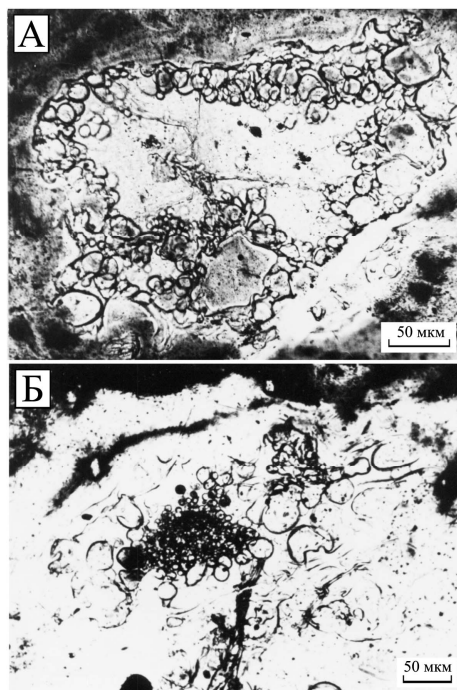
А – полученные экспериментально, на контакте частиц стали, отраженный свет; Б, В (поляризованный свет) – в импактиках Попигайской астроблемы (донные импактные брекчии), в том числе: Б – контакт стекол плавления полевошпатового (светлое, чистое) и апофемического (темное, раскристаллизованное) состава, образец № 9; В – контакт апогнейсовых стекол плавления близкого химического состава; одно из них чистое, свежее, другое – темное, раскристаллизованное; образец № 1044.

Легко можно представить, как под действием течения расплавные диспергиты такого рода преобразуются затем в тонко-полосчатую смесь двух стекол, аналогичных по текстуре описываемым образцам.

Тонкополосчатые стекла кратера Жаманиин. Тонкополосчатая текстура описываемых образцов связана не со степенью их раскристаллизации, а с чередованием светло- и темноокрашенных

Рис. 9. Образование эмульсионных глобулярных структур смешения в результате неустойчивого течения на границе раздела импактных расплавов разного состава:

А – начальный этап смешения – образование оторочки глобулей на контакте штира лешательерита (в центре) со смешанным стеклом апогейсового состава (окаймляющая масса, представленная смесью гиалиновых и раскристаллизованных разностей апогейсового стекла); Б – продвинутый этап смешения – образование глобулярного диспергита на месте штира лешательерита (центральная часть рисунка) в результате массового вторжения в последний глобулей вмещающего апогейсового стекла. Донная импактная брекчия Попигайской астроблемы, образец № 9, поляризованный свет.



полос стекла. При этом было обнаружено, что в пяти образцах (Ж 1-2, Ж 1-6, Ж 10, Ж 12 и Ж 13) химический состав различно окрашенных полос стекла довольно близок и представлен чередованием разностей петрохимических типов А и В (см. табл. 4 и рис. 4). За исключением малых различий в содержаниях Si и Al, по остальным элементам, включая такие основные хромофоры как Fe и Mn, эти стекла аналогичны. Более того, по количеству Fe, Ti, Mg и Mn светло-окрашенные стекла типа А даже богаче, чем темно-окрашенные стекла типа В (см. табл. 4). Так как полосчатая текстура указанных образцов не объясняется вариациями химического состава, то в этом отношении эти стекла аналогичны рассмотренным выше попигайским образцам. Что касается других пяти образцов кратера Жаманшин, то стекла, их слагающие (светлоокрашенный тип I и темноокрашенные петрографические типы III-V), имеют большие петрохимические различия, с чем может быть, отчасти, связана их полосчатость. Другие интерпретации на этот счет рассматриваются ниже.

Вода не играет роли в образовании полосчатой текстуры всех исследованных образцов кратера Жаманшин: это следует из ее крайне низкого содержания (0.001–0.059 вес. % H_2O) и неупорядоченного распределения в породе, которое не связано с окраской полос стекла (см. табл. 6). В то же время, различие окраски полос стекла во всех образцах хорошо согласуется с количеством иона Fe^{3+} в минеральной фазе, которое в темноокрашенных стеклах в 2–66 раз выше, чем в светлоокрашенных (см. табл. 7, рис. 7). Известно, что ион Fe^{3+} является одним из основных хромофоров, ответственных за окраску стекол разного состава. Поэтому мы можем заключить, что полосчатость образцов, сложенных чередованием стекол I и II петрографических типов (петрохимические типы А и В) связана с неравномерным распределением иона Fe^{3+} в породе. Это заключение подтверждается фактом близких валовых содержаний общего железа в обоих стеклах; более того, эти содержания в светлоокрашенных стеклах типа I (4.01 ± 0.67 вес. %) даже немного выше, чем в темноокрашенных стеклах типа II (3.28 ± 0.15 вес. %). Более высокие содержания иона Fe^{3+} в минеральной фазе установлены также в полосах темноокрашенных стекол из других образцов кратера (чередование стекол типа I со стеклами III-V типов). Это могло усилить интенсивность окраски темных стекол в добавление к повышенным содержаниям элементов-хромофоров в них.

Мы полагаем, что как различия химического состава полос стекла, так и неравномерная степень окисления железа в них были унаследованы из пород мишени. В рамках такой модели, тонкополосчатые стекла кратера Жаманшин имеют множественные источники и образовались в результате интенсивного смешения и аккреции частиц импактных расплавов, доставленных в зону контакта во взрывном облаке из пространственно разных горизонтов мишени. По аналогии с попигайскими образцами, наряду со смесительно-аккреционными механизмами, образование тонкодиспергированных смесей разных импактных расплавов могло происходить с участием процессов неустойчивого течения на границе раздела контактирующих расплавных фаз, подвергшихся повторной ударной нагрузке при столкновениях струй в зоне контакта. Тонкая структура образованных смесей и флюидальность образцов указывают на высокую температуру и большую подвижность импактных расплавов. Для тонкополосчатых образцов, сложенных чередованием петрохимически близких стекол типа А и В можно предположить также общий источник в мишени, а неравномерную степень окисления железа – захватом кислорода атмо-

сферы во время полета капельно-струйных выбросов импактного расплава в разных зонах взрывного облака. Как и для случая Попигайской астроблемы, условием реализации обоих возможных вариантов образования тонкополосчатых стекол кратера Жаманшин («унаследованного» и «воздушного») могла послужить сложная динамическая структура движения выбросов во взрывном облаке, связанная с приповерхностным отставанием фронта ослабленных ударных волн в мишени. Такая динамическая структура взрывного облака, возможно, является особенностью всех крупномасштабных импактных событий, протекающих на двуслойной мишени.

Вопрос о родительских породах для стекол кратера Жаманшин все еще открыт. П. В. Флоренский и А. И. Дабижа [26] полагают, что эти стекла представляют смеси импактных расплавов, возникшие на тонкослоистой гетерогенной мишени. Другие авторы [31, 39, 62] допускали, что стекла кратера являются продуктами импактного плавления лессов и глин осадочного чехла. По В. Л. Масайтису и Т. В. Селивановской [15], источником стекол послужили различные породы фундамента мишени. Однако, последнее заключение, во-первых, основано на ограниченном количестве анализов пород фундамента, а во-вторых, так же успешно применимо и к песчано-глинистым породам осадочного чехла. Используя данные Э. П. Изоха [11] по валовому составу различных пород мишени, можно видеть, что петрохимические типы А и В изучавшихся стекол близки как к кремнистым сланцам фундамента (Si, Al, Fe, Ti и P), так и к местным лессам (Si, Al, Ti, P), но полного сходства в обоих случаях не наблюдается. Таким образом, замечание Э. П. Изоха [11] о том, что прямых аналогов «тектитам-жаманшинитам» (которые соответствуют нашим стеклам А+В типа) в мишени нет, остается в силе. Мы предполагаем, что источником для всех изучавшихся стекол были песчано-глинистые породы осадочного чехла. Это можно видеть на рис. 10, на котором почти все наши стекла попадают в поле аренигов и алевролитов (кроме стекол петрохимического типа D, которые попадают в поле аргиллитов). При этом, возможным источником «фосфатно-кальциевых» стекол типа С могли быть верхнемеловые фосфоритоносные горизонты, известные в осадочном чехле, а горизонты железистых аренигов – источником «высокожелезистых» (тип E) стекол. Это заключение подтверждается и рис. 11, на котором почти все наши стекла попадают в поле «аркозов». Согласно [20], высокие соотношения K_2O/Na_2O в стеклах показывают, что родительские арениги были зрелыми породами, подвергшимися хорошо выраженному выветриванию. Ни один из составов исследованных стекол (Al/Si модуль <0.5) не попал

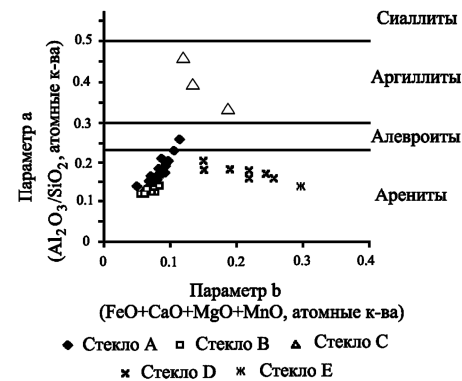


Рис. 10. Химические составы стекол типов А–Е из кратера Жаманшин, вынесенные на петрохимическую диаграмму классификации осадочных пород по [20].

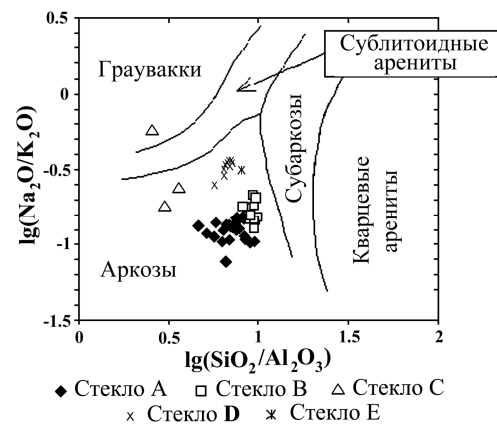
в поле «сиаллитов» и «аллитов» (рис. 10), то есть, кора выветривания мишени как родительский материал наших стекол исключается. Выяснение конкретного источника материала для этих стекол является предметом будущих детальных исследований осадочного чехла мишени.

Напомним, что по местным геологическим данным, суммированным Э. П. Изохом [11], осадочный чехол мишени кратера имеет мощность ~200–250 м и сложен нижнемеловыми каолиновыми и бокситовидными глинами альбского яруса (15–20 м), верхне-меловыми глинами и песками сеноманского яруса (до 40 м), темноцветными глинами туронского яруса (17 м), и известковисто-песчаными фосфоритоносными отложениями маастрихтского яруса (1–5 м); выше по разрезу залегают следующие палеогеновые отложения: палеоценовые глины, пески и опоки (15 м), эоценовые глины, алевриты и пески (65–149 м), верхнеэоценовые пески, глины и кварциты (2–16 м), эоценово-олигоценые пестроцветные гипсоносные глины (до 46 м), среднеолигоценые глины, алевриты и пески (15–25 м); разрез завершается верхнеолигеновыми – нижнеогеновыми песками, песчаниками и конгломератами (5–6 м). Осадочный чехол подстилается хорошо развитой корой выветривания, образованной по породам фундамента. Она сложена рыхлыми пестроцветными глинами, имеет мощность 40–45 м и сформировалась в доальбское время, в период длительного равнинного этапа развития территории, охватывавшего время от позднего палеозоя до позднего мезозоя. Породы фундамента имеют возраст от ~260 млн лет (позднекаменноугольные осадочно-вулканогенные отложения верхнего структурного яруса) до >400 млн лет (средне-протерозойские – нижнепалеозойские вулканогенно-кремнистые отложения нижнего структурного яруса).

Тонкополосчатые стекла вьетнамских тектитов. Флюидальные тектиты типа Муонг-Нонг имеют тонко- и микрополосчатую текстуру, образованную чередованием светлых и темных полос

Флюидальные тектиты типа Муонг-Нонг имеют тонко- и микрополосчатую текстуру, образованную чередованием светлых и темных полос

Рис. 11. Химические составы стекол типов А–Е из кратера Жаманшин, вынесенные на петрохимическую диаграмму классификации арени-тов и граувакк по [24].



стекала, но химические составы этих полос очень близки (см. табл. 5 и рис. 5). Те незначительные различия обоих стекол по содержанию главных петрогенных

компонентов, которые были обнаружены ранее [37, 48] и подтверждены нашими исследованиями, не могут быть причиной различной окраски полос. Более того, светлые стекла имеют более высокие содержания основных элементов-хромофоров (Fe, Mn), чем темноокрашенные. Этот факт позволяет рассматривать тектиты типа Муонг-Нонг как аналог вышеописанных тонкополосчатых стекол кратера Жаманшин, сложенных чередованием стекол петрохимических типов А и В. Сходство между этими тектитами и указанными стеклами кратера Жаманшин уже подчеркивалось другими исследователями [11, 51]. Тектиты типа Муонг-Нонг рассматриваются как продукты неполного смешения и гомогенизации различных родительских пород [48]. Тонкополосчатая текстура этих стекол выступает свидетельством очень низкой вязкости (и, соответственно, высокой температуры) и быстрой закалки образовавшихся смесей.

Низкое содержание воды, найденное в этих тектитах ранее [50] и подтвержденное нашими исследованиями (см. табл. 6), так же как и отсутствие различий в ее содержаниях между различно окрашенными стеклами [50] показывает, что образование полосчатой текстуры не связано с водой. Мы предполагаем, что эта полосчатость обусловлена неравномерной степенью окисления железа, и темноокрашенные стекла имеют повышенное содержание иона Fe^{3+} в минеральной фазе, подобное тому, которое было обнаружено в стеклах кратера Жаманшин, сложенных чередованием петрохимических разностей А и В. В этом отношении интересны данные [41] о гетерогенных магнитных особенностях тектитов типа Муонг-Нонг из Северной Америки; этими авторами предполагается, что названные особенности связаны либо с вариациями соот-

ношения Fe^{3+}/Fe^{2+} , либо с присутствием минеральных фаз, содержащих ион Fe^{3+} . Согласно представлениям о неполной гомогенизации исходных источников, неравномерная степень окисления железа могла быть унаследована из родительских пород. Полосчатость тектитов могла также образоваться в результате взаимодействия тектитного расплава с воздушным кислородом, как это предполагается для части изученных стекол кратера Жаманшин. Все модели происхождения данных тектитов должны включать высокоскоростной выброс импактных расплавов из кратера, их динамическое взаимодействие во взрывном облаке (мелкокапельная дезинтеграция, смешение с аккрецией или по механизму неустойчивого течения в результате столкновения струй, интенсивное течение и закалка). Здесь интересно отметить данные [60] о множественных столкновениях, которые происходили в полете между уже затвердевшими микротектитами.

Проблема происхождения тектитов австрало-азиатского ареала рассеяния (и других тектитов) имеет большое научное, мировоззренческое значение, и вокруг этой загадки уже почти 200 лет идет жаркая дискуссия [12]. Эти стекла были известны еще в глубокой древности и использовались как предметы культа в Юго-Восточной Азии. Высказывались самые разнообразные предположения об их происхождении, начиная от мистических представлений о «черных камнях» бога грома [29] и заканчивая «лунной», «кометной» и «импактной» гипотезами [12]. В настоящее время большинство исследователей поддерживает земную «импактную» гипотезу, однако споры о деталях такого механизма и о родительском кратере для рассматриваемых тектитов продолжают до сих пор. Имеется много гипотез о генетической связи тектитов типа Муонг-Нонг (и других тектитов данного поля рассеяния) с различными известными и предполагаемыми импактными структурами: кратером Эльгыгытгын [33], кратером Жаманшин [38, 62], озером Тонле-Сап в Индокитае [43, 44] или с каким-либо другим, до сих пор не обнаруженным импактным кратером в этом регионе [54]. Почти все гипотезы об индокитайской локализации родительского кратера исходят из представлений, что разлет тектитов был очень кратковременным, отложение материала произошло поблизости от точки удара, которая находится внутри австрало-азиатского ареала рассеяния, а преодоление атмосферного барьера наложило отпечаток на внутреннюю структуру этого ареала, определяя особенности пространственного распределения разных тектитов в последнем; считается также, что тектиты типа Муонг-Нонг отложились на ближайшем расстоянии от кратера. Особенно привлекательным

в этом отношении становится изолированное поле рассеяния в центральном Лаосе и Вьетнаме, где присутствуют тектиты только типа Муонг-Нонг [35]. Между тем, в случае длительной транспортировки тектитов в околоземном пространстве, когда полет мог занимать несколько суток [5], а траектории движения выбросов в таком случае становились очень сложными [28], все наблюдаемые особенности строения австрало-азиатского поля рассеяния могут иметь совершенно другую природу, чем та, которой руководствуются сейчас сторонники индокитайского родительского кратера. Это же относится и к оценкам диаметра родительского кратера (~50–100 км: [49, 54]).

Вернемся к гипотезе о связи описываемых тектитов с кратером Жаманшин [38, 62], которая затем была поддержана Э. П. Изохом [11], хотя последний выдвинул свою оригинальную трактовку этой гипотезы. Согласно [11], некоторые кислые стекла кратера Жаманшин (аналогичные тонко-полосчатым разностям с чередованием стекол петрохимических типов А + В, описанным в нашей работе) и тектиты типа Муонг-Нонг имеют общий кометный источник. Хотя мы не поддерживаем эту гипотезу, тем не менее, мы считаем, что то макроскопическое, а также определенное петрографическое и геохимическое сходство (включая близкое содержание воды и степень окисления железа), которое существует между указанными стеклами кратера Жаманшин и данными тектитами, является не случайным и должно обязательно учитываться всеми исследователями тектитов. В этой связи, вопрос об источнике описываемых стекол кратера Жаманшин становится одним из ключевых моментов в решении проблемы происхождения тектитов типа Муонг-Нонг в Австрало-азиатском поле рассеяния.

В порядке комментария отметим, что в настоящее время связь австрало-азиатских тектитов с кратером Жаманшин отрицается [48, 53, 61], и основанием для этого являются два заключения. 1) Исследователи не нашли полной химической аналогии между импактитами данного кратера и указанными тектитами [51]. Между тем, по нашему мнению, родительский субстрат и возникшие из него тектиты могут иметь определенные различия, поскольку материал тектитов подвергся сильнейшему ударному метаморфизму (селективное испарение, фракционирование и другие процессы, происходившие во взрывном облаке); эти изменения исследованы пока мало. 2) Данные трековых определений возраста указанных тектитов и импактитов [53, 61] были неоправданно абсолютизированы. Однако они весьма противоречивы и если следовать им буквально, то единое австрало-азиатское поле рассеяния тектитов

становится разновозрастным образованием (два типа тектитов с возрастом в 0.69 и 0.83 млн лет по [61] и даже три типа, с возрастными 0.47, 0.62 и 0.81 млн лет по [45]). Аналогичное противоречие получено и для одноактно-возникшего комплекса импактитов кратера Жаманшин («кислые» стекла – 0.7–1.1 млн лет, а «основные» стекла – <0.1 млн лет по [46]). При этом, если австрало-азиатские тектиты продолжают считаться единым комплексом, а противоречие их возрастов рассматривается как некий возрастной парадокс, то трековые датировки импактитов кратера Жаманшин были восприняты как достоверные. Все это показывает, что проблема связи указанных тектитов с кратером Жаманшин остается открытым вопросом и рано или поздно будет вновь поставлена в повестку дня.

Полезные реконструкции особенностей родительских пород мишени для данных тектитов были сделаны К. Коберлом [48]. Согласно его Sm/Nd – Rb/Sr данным, возможным источником тектитов типа Муонг-Нонг являются продукты неполной импактной гомогенизации пород типа граувакк, песчаников и глинистых сланцев, имеющие возраст ~ 167 млн лет. Можно видеть, что нижнемеловые породы осадочного чехла в мишени кратера Жаманшин весьма близки к этому возрастному порогу, в то время как породы фундамента не удовлетворяют данному критерию как гораздо более древние геологические образования. По своим размерам и географической локализации кратер Жаманшин вполне может быть источником описываемых тектитов. Его диаметр составляет ~ 13 км [17], а энергия импактного события может быть оценена нами ~ $6 \cdot 10^{19}$ Дж. Данные В. Альвареса [28] показывают, что для преодоления расстояния ~ 6000 км между импактным кратером и пунктами отложения выбросов (вариант кратковременного полета австрало-азиатских тектитов из кратера Жаманшин) скорости этих выбросов должны быть ~ 5–6 км/с. Такие скорости вполне приемлемы для импактного события Жаманшин, с тем, чтобы его дальние выбросы отложились в Индокитае.

Заключение

1. Попигаийские тонкополосчатые стекла сложены петрохимически близкими разностями, различными между собой по степени раскристаллизации вследствие неравномерного распределения воды. Это распределение унаследовано из пород мишени и указывает на пространственно различные родительские источники в архейских кристаллических породах фундамента. Отчасти, такое распределение воды могло быть связано с ее захватом во время

полета частиц импактного расплава в разных зонах взрывного облака. Тонкополосчатые стекла кратера Жаманшин представляют неомогенизированные смеси расплавов, имевших множественные родительские источники в осадочном чехле мишени. Полосчатая текстура этих стекол связана с неравномерным окислением железа и различиями состава, унаследованными из пород мишени. Отчасти, неравномерное окисление железа могло образоваться при взаимодействии частиц расплава с кислородом воздуха во время полета.

2. Текстура и особенности состава тонкополосчатых стекол Попигайской астроблемы и кратера Жаманшин указывают на их образование в результате смещения и аккреции мелких порций расплава в особых динамических условиях во взрывном облаке. Вследствие образования системы сталкивающихся струй, выброшенных из разных зон ударного метаморфизма, в этом облаке существовали сложные вихревые движения, сопровождавшиеся интенсивной дезинтеграцией выброшенного материала, его перемешиванием и вторичным ударным взаимодействием. Вторичные ударные столкновения могли сопровождаться явлениями неустойчивого пограничного течения контактирующих расплавных масс. Все эти процессы происходили в весьма подвижном перегретом состоянии и сопровождались интенсивным течением. Вследствие закалки, возникшие смеси сохранили свою гетерогенность, в том числе и неоднородное распределение воды. Таким образом, описанные стекла имели сложную историю образования, и представляют довольно специфические породы в обоих импактных кратерах. Мы предлагаем выделить их в особую фацию расплавных импактитов. Особенно широко они распространены в кратере Жаманшин, где неоднократно описывались как гетерогенные полосчатые стекла [11, 18, 25]. По этой причине, данная фация импактных стекол может быть названа как «жаманшинитовая» («ZH-facies» of impact melt rocks). Модели образования этих стекол базируются на унаследованной или приобретенной гетерогенности («вещественной», «водной» или «воздушно-окислительной») и могут действовать во многих случаях. Мы предполагаем, что стекла «жаманшинитовой» фации присутствуют в зювитах многих других больших астроблем, заложенных на двуслойной гетерогенной мишени.

3. Тектиты типа Муонг-Нонг из Индокитая тоже могут рассматриваться как стекла «жаманшинитовой» фации, поскольку имеют большое макроскопическое, петрографическое и геохимическое сходство с теми из тонкополосчатых стекол кратера Жаманшин, которые сложены чередованием разностей петрохимиче-

ских типов А и В. Полосчатость этих тектитов возникла без участия воды и, по-видимому, связана с неоднородным окислением железа, унаследованным из родительских источников или приобретенным в полете, подобно тому, как это предполагается «воздушно-окислительной» моделью для части стекол кратера Жаманшин. Сравнительное исследование степени окисления железа в светлых и темных полосах указанных тектитов пока является нерешенным вопросом и представляет задачу будущих исследований. За пределами Юго-Восточной Азии аналоги тектитов типа Муонг-Нонг обнаружены в Северной Америке [41, 67], Европе [40] и в океанических осадках [52]. Эти находки показывают, что стекла «жаманшинитовой» фации широко распространены среди тектитов.

4. Проблема взаимосвязи индокитайских тектитов типа Муонг-Нонг с кратером Жаманшин, равно как и поиск источника стекол «жаманшинитовой» фации в самом кратере представляют еще открытые вопросы. Выявление этого источника в породах мишени кратера может стать ключевым вкладом в решение проблемы генезиса указанных тектитов. В качестве родительского источника стекол «жаманшинитовой» фации мы предполагаем аркозовые, арнитовые, алевролитовые и алевро-пелитовые разности из нижней части разреза осадочного чехла мишени. В этой связи, необходимо детальное изучение этого чехла. Решение данного вопроса позволит либо подтвердить правильность отнесения тектитов типа Муонг-Нонг к стеклам «жаманшинитовой» фации (в качестве связующего звена между собственно тектитами и расплавленными импактитами метеоритных кратеров), либо поможет установить иные родительские источники указанных тектитов.

Благодарности. Образцы вьетнамских тектитов были получены из Минералогического музея ОИГГМ СО РАН г. Новосибирска. Д-р Дж. Пратеси (Университет Флоренции, Италия) сделал ряд полезных замечаний на предварительной стадии подготовки этой публикации. Особую благодарность мы хотели бы выразить д-ру К. Коберлу (Институт геохимии Университета Вены, Австрия) и трем его анонимным западным коллегам за большой труд в прочтении рукописи нашей работы и ее конструктивную критику: часть их замечаний была учтена и заметно улучшила изложение материала и ряд акцентов, сделанных по существу проведенного исследования. Мы очень признательны д-ру К. Коберлу за отписки многих ключевых работ, освещающих затронутые проблемы. На завершающих этапах работа производилась при частичной поддержке гранта РФФИ № 01-05-65233.

Литература

1. Вальтер А. А., Гуров Е. П., Гурова Е. П., Ефименко В. В. Плавление при ударном сжатии // Геология и петрология взрывных метеоритных кратеров / Под ред. В.А. Рябенко. Киев: Наукова Думка, 1982. С. 89–115.
2. Вишневский С. А. Особенности пород Попигайской структуры и ее происхождение. Дисс... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1978. 273 с.
3. Вишневский С. А. Импациты гигантских сложных метеоритных кратеров // Импациты / Под ред. А. А. Маракушева. Москва: МГУ. 1981. С. 171–184.
4. Вишневский С. А., Пальчик Н. А. Графит в породах Попигайской структуры: разрушение и переход в другие фазы системы углерода // Геология и Геофизика. 1975. № 1. С. 67–75.
5. Вишневский С. А. Тектиты: некоторые проблемы и импактная гипотеза // XXI Всесоюзная метеоритная конференция 24–26 апреля 1990 г. Миасс. Тезисы докладов. Москва: ГЕОХИ АН СССР, 1990. С. 44–45.
6. Вишневский С. А. Зювитовые мегабрекчии – новый тип отложенный взрывного облака в Попигайской астроблеме. Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1994. 66 с.
7. Вишневский С. А., Поспелова Л. Н. Флюидный режим импацитов: плотные включения в высококремнеземистых стеклах и их петрологическое значение. Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1988. 53 с.
8. Вишневский С. А., Ставер А. М. Некоторые особенности деформации и плавления при ударном метаморфизме // Геология и Геофизика. 1985. № 2. С. 22–30.
9. Гельман Е. М., Старобина И. З. Определение породообразующих элементов (силикатов и карбонатов) фотометрическим методом // Труды IV Геохимического конгресса, Ленинград. 1972. С. 50–52.
10. Гусев Г. М., Гулецкая Э. С., Козырев Н. Л. Численные методы определения содержания элементов при фотометрическом анализе минералов и материалов // Физические и химические методы исследований в геологии (Труды Института Геологии и Геофизики СО АН СССР № 450). Новосибирск: Наука. 1981. С. 189–192.
11. Изох Э. П. Петрохимия пород мишени, импацитов и тектитов кратера Жаманшин // Космическое вещество и Земля / Под ред. Ю. А. Долгова. Новосибирск: Наука. 1986. С. 159–202.
12. Изох Э. П., Ле Дык Ан. Тектиты Вьетнама: гипотеза кометной транспортировки // Метеоритика. 1983. вып. 42. С. 158–169.
13. Коротаева Н. Н., Полосин А. В., Мальшева Т. В. Валентно-координационное состояние ионов железа в тектитах и импацитах // Геохимия. 1985. № 6. С. 899–903.
14. Лаврентьев Ю. Г., Поспелова Л. Н., Соболев Н. В., Маликов Ю. И. Определение породообразующих минералов рентгеноспектральным микроанализом на электронном микрозонде // Заводская Лаборатория. 1974. № 40. С. 657–661.

15. Масайтис В. Л., Селивановская Т. В. Петрохимические типы импактных расплавов кратера Жаманшин и их реконструируемые исходные субстраты // Записки ВМО. 1987. Ч. 116 (1). С. 52–59.
16. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигаийский метеоритный кратер. Москва: Наука, 1975. 124 с.
17. Масайтис В. Л., Бойко Я. И., Изох Э. П. Астроблема Жаманшин: параметры и особенности внутреннего строения // XIX Всесоюзная Конференция по Метеоритике и Космохимии. Тезисы докладов. Москва: Институт Геохимии и Аналитической химии АН СССР. 1984. С. 102–104.
18. Масайтис В. Л., Селивановская Т. В., Изох Э. П. Импактиты первого рода из астроблемы Жаманшин // Метеоритика. 1986. Вып. 45. С. 142–149.
19. Масайтис В. Л., Мацак М. С., Селивановская Т. В., Райхлин А. И., Данилин А. Н. Попигаийская астроблема // Геология астроблем / Под ред. Ю. Е. Погребещкого. Ленинград: Недра. 1980. С. 114–130.
20. Неелов А. Н. Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканогенных пород // Ленинград: Наука. 1980. 100 с.
21. Осоргин Н. Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология) // Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1990а. 32 с.
22. Осоргин Н. Ю. Источники ошибок определения состава летучих при термическом методе дегазации образцов // Термобарогеохимия минералообразующих процессов / Под ред. В.А. Симонова. Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1990б. С. 120–129.
23. Осоргин Н. Ю. Хроматографическое устройство для одновременного определения органических и неорганических газов (оценка инструментальной погрешности) // Термобарогеохимия минералообразующих процессов / Под ред. В.А. Симонова. Новосибирск: Институт Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1990в. С. 129–140.
24. Петтиджон Ф. И., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники // Москва: Мир. 1976. 534 с.
25. Флоренский П. В. Метеоритный кратер Жаманшин и его тектиты и импактиты // Известия АН СССР. 1975. № 10. С. 73–86.
26. Флоренский П. В., Дабижка А. И. Метеоритный кратер Жаманшин // Москва: Наука. 1980. 128 с.
27. Фрих-Хар Д. И. Кристаллизация магматических стекол и некоторые проблемы петрологии // Москва: Наука. 1977. 120 с.
28. Alvarez W. (1996) Trajectories of ballistic ejecta from the Chixcubulub crater // The Cretaceous/Tertiary event and other catastrophes in Earth history / Eds. Ryder G., Fastovsky D., Gartner S. Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper. 1996. V. 307. P. 141–150.
29. Barnes V. E., Barnes M. A. (eds.). Tektites // Stroudsburg: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., 445 p.
30. Beran A., Koeberl C. Water in tektites and impact glasses by fourier-transformed infrared spectrometry // Meteoritics and Planetary Science. 1997. № 32. P. 211–216.

31. *Bouska V. V., Povondra P. V., Florensky P. V., Randa Z.* Irgizites and zhamanshinites: Zhamanshin crater, USSR // *Meteoritics*. 1981. № 16. P. 171–184.
32. *Carstens H.* Thermal history of impact melt rocks of the Fennoscandian Shield // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1975. № 50. P. 145–155.
33. *Dietz R. S.* El'gygytgyn crater, Siberia: Possible source of Australasian tektite field // *Meteoritics*. 1977. № 12. P. 145–157.
34. *Dunlap R. A., Eelman D. A., Mackay G. R.* A Mossbauer effect investigations of correlated hyperfine parameters in natural glasses (tektites) // *J. Non Cryst. Sol.* 1998. № 223. P. 141–146.
35. *Fiske P. S., Schnetzler C. C., McHone J., Chauthavaichith K. K., Homsombath I., Phouthakayalat T., Khenthavong B., Xuan P. T.* Layered tektites of southeastern Asia: Field studies in central Laos and Vietnam // *Meteoritics and Planet. Science*. 1999. № 34. P. 757–761.
36. *French B. M.* Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution No. 954 // Lunar and Planetary Institute, Houston. 1998. 120 p.
37. *Futrell D. S., Fredriksson K.* Brecciated Muong Nong-type tektites // *Meteoritics*. 1983. № 18. P. 15–17.
38. *Glass B. P.* The Zhamanshin crater, a possible source of Australasian tektites // *Geology*. 1979. № 7. P. 351–353.
39. *Glass B. P., Fredriksson K., Florensky P. V.* Micro-irgizites recovered from a sediment sample from the Zhamanshin impact structure // *Journal of Geophysical Research*. 1983. B88, Supplement. P. 319–330.
40. *Glass B. P., Wasson J. T., Futrell D. S.* A layered moldavite containing baddeleyite // *Proc. 20th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1990. P. 415–420.
41. *Glass B. P., Koeberl C., Blum J. D., Senfite F., Izett G. A., Evans B. J., Thorpe A. N., Povenmire H., Strange R. L.* A Muong Nong-type Georgia tektite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59 (19). P. 4071–4082.
42. *Graup G.* Terrestrial chondrules? Glass? Spherules and accretion lapilli from the suevite, Ries Crater, Germany // *Earth and Planetary Science Letters*. 1981. V. 55. P. 407–418.
43. *Hartung J. B.* Australasian tektite source crater? Tonle Sap, Cambodia // *Meteoritics*. 1990. № 25. P. 369–370 (abs.).
44. *Hartung J., Koeberl C.* In search of the Australasian tektite source crater: the Tonle Sap hypothesis // *Meteoritics*. 1994. № 29. P. 411–416.
45. *Kashkarov L. L., Genaeva L. I., Lavrukhina A. A., Izokh E. P.* The different ages of Vietnam tektites // *Second International Conference on Natural Glasses, Prague, September 21–23, 1987. Abstracts.* Eds. Jelinek. E. Prague, Charles University Press. 1987a. P. 34–35.
46. *Kashkarov L. L., Genaeva L. I., Izokh E. P.* Fission track dating for glasses from Zhamanshin astrobleme // *Ibidem*. 1987b. P. 32–33.
47. *Koeberl C.* Blue glass: A new impactite variety from Zhamanshin crater, U.S.S.R // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. P. 779–784.
48. *Koeberl C.* Geochemistry and origin of Muong Nong-type tektites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992. V. 56. P. 1033–1064.

49. *Koeberl C.* Tektite origin by hypervelocity asteroidal or cometary impact: target rocks, source craters, and mechanisms // *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution* / Eds. Dressler D. O., Grieve R. A. F., Sharpton V. L. Geological Society of America Special Paper 293. Boulder, Colorado, USA. 1994. P.133–151.
50. *Koeberl C., Beran A.* Water content of tektites and impact glasses, and related chemical studies // *Proc. 18th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1988. P. 403–408.
51. *Koeberl C., Fredriksson K.* Impact glasses from Zhamanshin crater (USSR): Chemical composition and discussion of origin // *Earth and Planet. Science Letters.* 1986. V. 78. P. 80–88.
52. *Koeberl C., Glass B. P.* Chemical composition of North American microtektites and tektite fragments from Barbados, and DSDP Site 612 on the continental slope of New Jersey // *Earth and Planetary Science Letters.* 1988. V. 87. P. 286–292.
53. *Koeberl C., Storzer D.* Chemical compositions and fission track age of Zhamanshin crater // *Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Glasses.* Prague, Charles University Press. 1988. P. 207–213.
54. *Lee, Meng-Yang, and Wei, Kuo-Yen* Australasian micro-tektites in the South China Sea and the West Philippine Sea: Implications for age, size and location of the impact crater // *Meteoritics and Planetary Science.* 2000. V. 35. P. 1151–1155.
55. *Maxwell D. E.* Simple Z-model of cratering, ejection and overturned flap // *Impact and Explosion Cratering*/ Eds. Roddy D. J., Pepin R. O., Merrill R. B. New York: Pergamon Press. 1977. P.1003–1008.
56. *Montanari A., Koeberl C.* Impact Stratigraphy: The Italian record. *Lecture Notes in Earth Science*, vol. 93. Heidelberg-Berlin, Springer-Verlag. 2000. 364 p.
57. *Orville P.* Plagioclase cation exchange equilibria with aqueous chloride solution: results at 700°C and 2000 bars in the presence of quartz // *Amer. J. of Science.* 1992. V. 272. P. 234–272.
58. *Pohl J., Stoffler D., Gall H., Ernstson K.* The Ries impact crater // *Impact and Explosion Cratering* // Eds. Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R. B. New York: Pergamon Press. 1977. P. 343–404.
59. *Rossano S., Balan E., Morin G., Bauer J. P., Calas G., Brouder C.* ⁵⁷Fe Mossbauer spectroscopy of tektites // *Phys. Chem. Minerals.* 1999. V. 26. P. 530–538.
60. *Shyam P. M. Sudhakar M.* Collisions in the ejecta plume of the Australasian impact event // *Lunar and Planetary Science Conference 27th, March 18–22. 1996. Abstract Papers.* Houston, LPI. V. 27. Part 3. P. 1053 (abs.).
61. *Storzer D., Wagber G. A.* Two discrete tektite-forming events 140 thousands apart in the Australian-Southeastern Asian area // *Meteoritics.* 1989. V. 15. P. 372.
62. *Taylor S. R., McLennan S. M.* Chemical relationships among irgizites, zhamanshinites, Australasian tektites and Henbury impact glasses // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1979. V. 43 (9). P. 1551–1565.

63. *Vishnevsky S. A.* Two groups of Popigai impact glasses: a result of initial water content in target rocks // *Chemie der Erde*. 1996. V. 56. P. 493–497.

64. *Vishnevsky S. A., Montanari A.* Petrology and geochemistry of Popigai impact melt rocks: a selection of material for potentially-reliable radio-isotopic dating // *ESF Scientific Network in impact cratering and evolution of Planet Earth. Post-Ostersund Newsletter / Eds. A. Montanari A., Smit J.* 1994. P. 16–27.

65. *Vishnevsky S. A., Montanari A.* The Popigai impact structure (Arctic Siberia, Russia): geology, petrology, geochemistry and geochronology of glass-bearing impactites // *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II/ Eds. Dressler B. O., Sharpton V. L.* Geological Society of America Special Paper # 339. Boulder, Colorado. 1999. P. 19–59.

66. *Vishnevsky S. A., Gilinskaya L. N., Istomin V. E., Pal'chik N. A., Lebedeva S. M.* Impact glasses and tektites of ZH-facies: Some features of rocks and models of their origin // 4th ESF-IMPACT Workshop «Meteorite Impacts in Pre-Cambrian Shields»/ Eds. Plado J., Pesonen L. J. Espoo, Finland, Geological Survey of Finland Press. 2000. P. 100 (abs.).

67. *Wittke J. H., Barnes V. E.* Multi-component source for Muong Nong-type bediasite 30775-2 (abs.) // *Meteoritics*. 1988. V. 23. P. 311.

68. *Yagi K., Kuroda Y., Koshimizu S.* Chemical composition and fission track age of some Muong Nong-type tektites // *Proc. 7th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo. 1982. P. 162–170.

69. *Zolensky M. E., Koeberl C.* Liquid immiscibility in an impact melt: or why are the blue zhamanshinites blue? // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 1483–1486.

