

УДК 551.21+552.11

## СОСТАВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ В ПРОДУКТАХ ВЕРШИННОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ И ПОБОЧНОГО ПРОРЫВА ИМ. Г.С. ГОРШКОВА НА ВУЛКАНЕ КЛЮЧЕВСКОЙ в 2020–2021 гг.: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

© 2022 г. Н. В. Горбач<sup>а</sup>, \*, Т. М. Философова<sup>а</sup>, Д. В. Мельников<sup>а</sup>, Т. М. Маневич<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пуйна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

\*e-mail: n\_gorbach@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 27.07.2021 г.

Принята к публикации 25.10.2021 г.

Представлены результаты анализа химического состава вулканических стекол в продуктах извержений вулкана Ключевской в 2020–2021 гг. Приведены краткие сведения о вещественном составе андезибазальтов ( $\text{SiO}_2$  – 53.5,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 16.35,  $\text{MgO}$  – 6.61,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.98 (мас. %)) начального этапа активности побочного прорыва им. Г.С. Горшкова. Вариации состава вулканических стекол в продуктах вершинного извержения и последующего побочного прорыва отражают степень кристалличности изученных частиц тефры и последовательную смену популяций микролитов на завершающих стадиях кристаллизации андезибазальтовой магмы. Сравнение полученных нами составов стекол с аналогичными данными для тефры эруптивных эпизодов 2010 и 2016 гг. показывает их полную идентичность, что свидетельствует о постоянном составе андезибазальтовой магмы, питающей современные извержения вулкана.

*Ключевые слова:* вулканическое стекло, вулкан Ключевской, прорыв им. Г.С. Горшкова, тефра

**DOI:** 10.31857/S0203030622010035

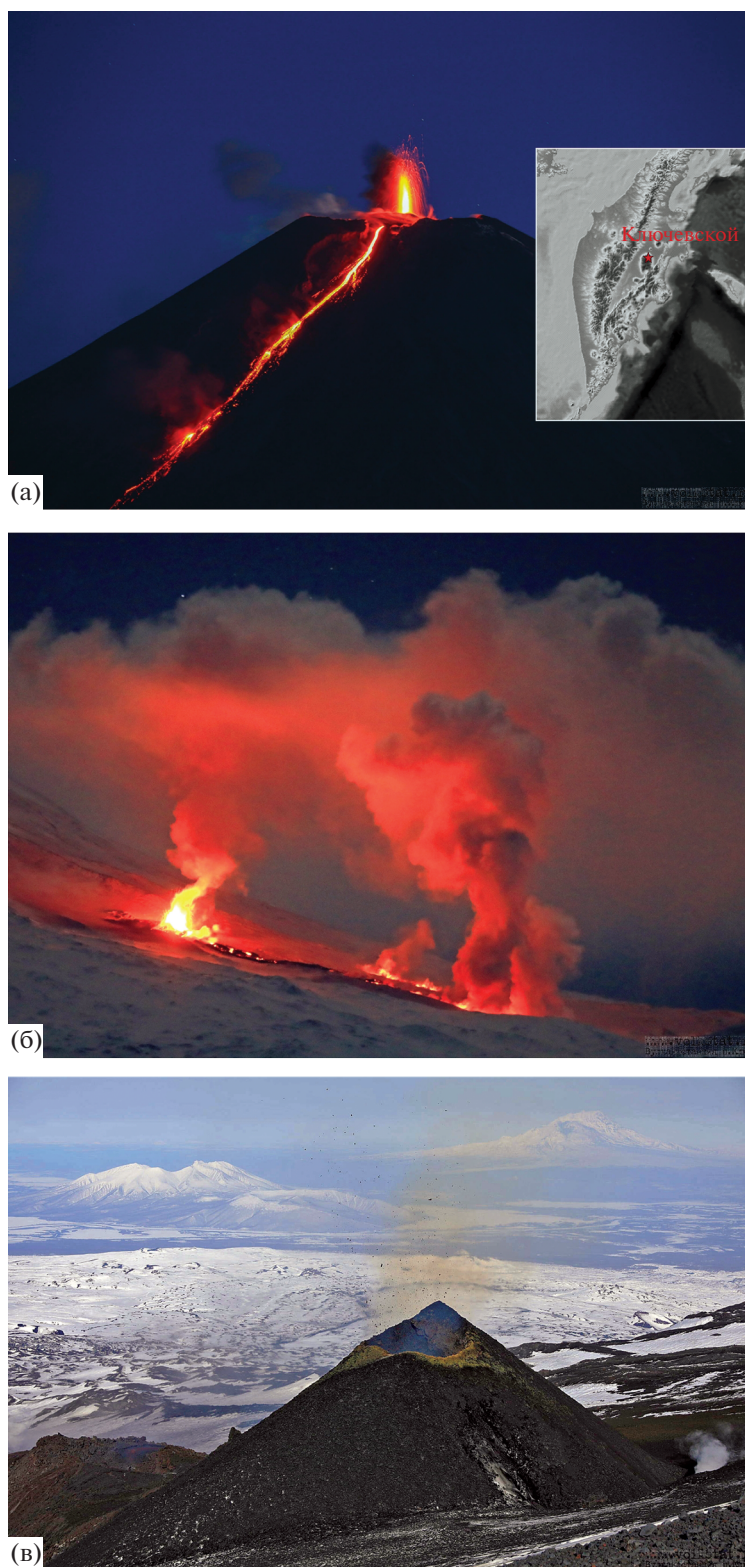
### ВВЕДЕНИЕ

Недавнее вершинное извержение вулкана Ключевской (рис. 1) – наиболее крупного голоценового вулкана Камчатки и одного из наиболее продуктивных в мире – длилось около 5 месяцев (конец сентября 2020 г. – февраль 2021 г.). Протяженные лавовые потоки изливались на северо-восточный и южный склоны вулкана, наблюдалась мощная стромболианская активность и обрушения пирокластического материала по бортам Апахончичского желоба [Гирина и др., 2021]. На сегодняшний день тефра является единственным источником информации о составе продуктов этого извержения, поскольку отбор образцов лав в процессе их излияния на абсолютных высотах более 4000 м чрезвычайно опасен, а в зимнее время практически невозможен. Побочный прорыв им. Г.С. Горшкова начал свою работу на абсолютной высоте 2800 м через несколько дней после прекращения извержения из вершинного кратера [Гирина и др., 2021]. Отбор продуктов извержения и в этом случае был не простой задачей, однако она была реализована успешно [Озеров и др., 2021].

Одним из первых шагов к пониманию динамики магматических процессов, в результате ко-

торых извержение из вершинного кратера сменилось образованием побочного прорыва на склоне вулкана, является сравнительная оценка состава продуктов, изверженных из различных эруптивных центров. Сравнение образцов тефры вершинного извержения и лав побочного прорыва по валовому химическому составу может быть не вполне корректным. Во время пеплопада материал претерпевает гравитационную эоловую дифференциацию и обогащается отдельными компонентами (минералами или вулканическим стеклом) на различном удалении от центра извержения [Кириянов, Соловьева, 1990; Braitseva et al., 1997]. Вследствие этих процессов химический состав образцов пепла зависит от мощности эксплозивного события и нагруженности пеплового шлейфа материалом, а также от удаленности точки отбора образца от вулкана.

Анализ химического состава вулканического стекла в пепловых частицах, шлаковых лапилли и фрагментах вулканических бомб предоставляет возможность корректного сопоставления продуктов вершинного и побочного извержений. Состав вулканических стекол отвечает последним по времени расплавам, существовавшим в магматической камере/канале до или во время извержения,



**Рис. 1.** Эруптивная активность вулкана Ключевской в конце 2020 г. – начале 2021 г.  
а – стромболианская активность вершинного кратера и излияние лавы по Апахончичскому желобу в декабре 2020 г.;  
б – побочный прорыв им. Г.С. Горшкова в конце февраля 2021 г.; в – завершающие эпизоды активности побочного прорыва во второй половине марта 2021 г. Фото Ю.В. Демянчука, <http://volkstat.ru/index.php/gallery/>.

и может быть использован в качестве простого, но чувствительного критерия изменений состава магм во времени [Портнягин и др., 2011; Пономарева и др., 2012]. Анализ составов вулканических стекол в последовательных порциях изверженного материала может дать информацию об изменении состава магмы в ходе извержения и, следовательно, о возможных изменениях в эруптивном стиле вулкана [Горбач и др., 2018].

Для сопоставления продуктов вершинного и побочного извержений мы определили содержания главных компонентов в вулканических стеклах из образцов пеплов, связанных с эксплозивной активностью вулкана в ноябре и декабре 2020 г. и из фрагментов вулканической бомбы начального этапа активности прорыва им. Г.С. Горшкова в марте 2021 г. Результаты анализа показывают, что оба эпизода эруптивной активности – вершинное извержение и начало активности побочного прорыва – были связаны с подъемом близкой по составу магмы. Полученные нами составы стекол продолжают тренд составов природно-закаленных включений расплава в оливинах более ранних вершинных извержений [Хубуная и др., 2018], что позволяет рассматривать изверженные продукты 2020–2021 гг. в качестве производных глиноземистой андезибазальтовой магмы, типичной для вершинных и большинства побочных извержений Ключевского вулкана [Озеров, 2019]. Сравнение составов стекол недавних извержений с аналогичными данными для продуктов предшествующих эруптивных эпизодов в 2010 и 2016 гг. показывает их полную идентичность, что свидетельствует о постоянном составе андезибазальтовой магмы, питающей современные извержения вулкана.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав вулканических стекол был проанализирован в четырех образцах: три образца характеризуют пеплы крупных эксплозивных событий в ноябре и декабре 2020 г. и один образец представляет собой фрагмент вулканической бомбы прорыва им. Г.С. Горшкова. Образцы пеплов вершинного извержения отбирались в районе с/с Апахончич (19 ноября 2020 г.), и в поселке Козыревск (7 и 14 декабря 2020 г.); материал прорыва им. Г.С. Горшкова был отобран 7 марта 2021 г. Все образцы были монтированы в препараты из эпоксидной смолы, отполированы на алмазных пастах и покрыты углеродным напылением. Определение содержаний главных компонентов (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K и P) в вулканических стеклах было выполнено в ИВиС ДВО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max80mm<sup>2</sup> и программным обеспечением AZtec. Условия анализа составили: ускоряющее напряжение 20 кВ,

ток на эталоне никеля ~0.7–0.75 нА, время счета 3 с и диаметр электронного пучка 5 мкм. Для каждого образца было получено от 30 до 50 анализов стекол (всего 185 анализов). Для контроля качества анализа был использован стандартный образец вулканического стекла USNM 111240/52 (VG-2) [Jarosewich et al., 1980]. Анализ стандартного образца проводился в начале работы, через каждые 40–50 анализов и в конце аналитической сессии. На основе повторяющихся измерений стандартного образца погрешность анализа ( $2\sigma$ ) составила (мас. %): 0.73 для SiO<sub>2</sub>, 0.17 для TiO<sub>2</sub>, 0.14 для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.32 для FeO, 0.24 для MgO и CaO, 0.09 для Na<sub>2</sub>O, 0.08 для K<sub>2</sub>O и 0.07 для P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Обработка полученных данных была выполнена по методике, которая применяется при массовом анализе тефры Камчатки [Portnyagin et al., 2020; Ponomareva et al., 2021] и положена в основу тефростратиграфических корреляций. Из рассмотрения исключались анализы с низкой суммой оксидов (менее 95 мас. %), а также анализы, сделанные с захватом минеральных фаз (плаггиоклаза, пироксенов и магнетита), что определялось по избыточным содержаниям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO или FeO\* по сравнению с преобладающим составом стекол в образце. Для построения графиков, представленных в данной работе, все анализы стекол приводились к сумме оксидов 100%. Представительные анализы стекол приведены в табл. 1.

Анализ валового химического состава образцов тефры вершинного извержения и материала побочного прорыва был выполнен рентгенофлуоресцентным методом при помощи рентгеновского спектрометра с волновой дисперсией S8 TIGER в центре коллективного пользования Института геохимии им. А.П. Виноградова коры СО РАН (г. Иркутск) по методике [Amosova et al., 2016].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Вещественный состав тефры вершинного извержения и материала побочного прорыва им. Г.С. Горшкова*

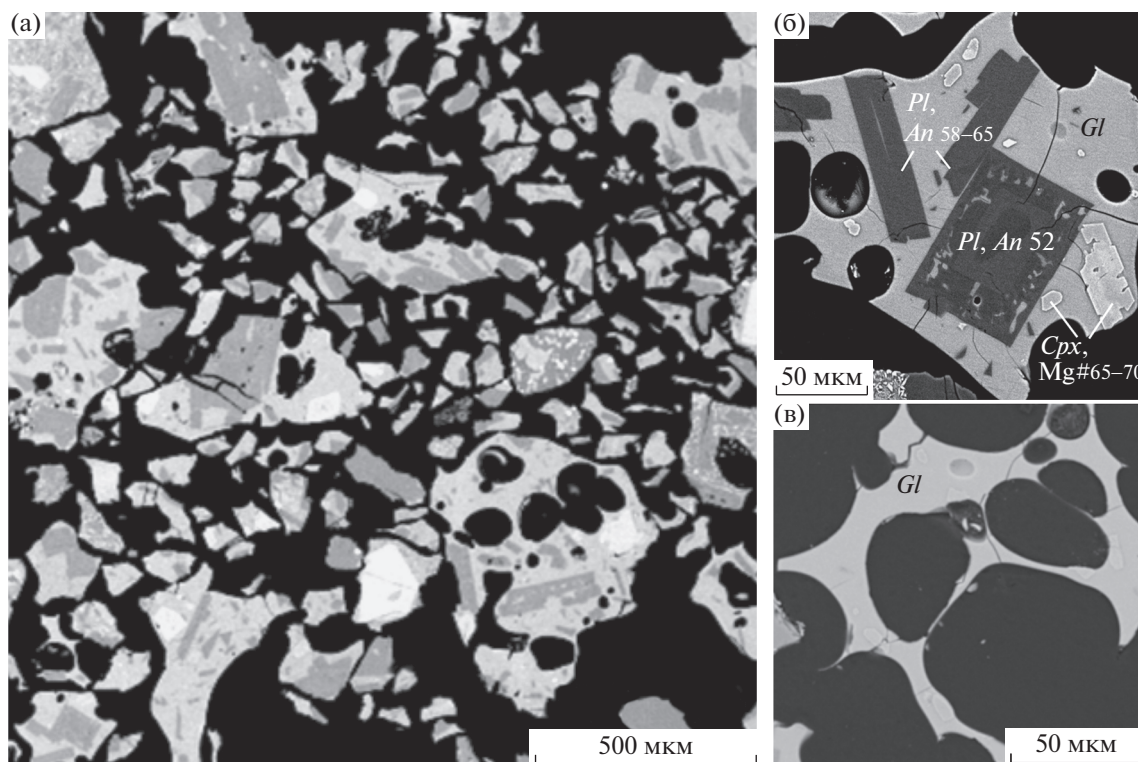
Образцы пеплов вершинного извержения представлены черным средне- и мелкозернистым вулканическим песком, по химическому составу отвечающему андезибазальту. Содержания петрогенных окислов в пеплах, изверженных в декабре 2020 г., составили (мас. %): SiO<sub>2</sub> – 54.17, TiO<sub>2</sub> – 1.12, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 17.03, FeO\* – 8.51, MnO – 0.17, MgO – 5.36, CaO – 8.18, Na<sub>2</sub>O – 3.25, K<sub>2</sub>O – 1.08, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.21. Пеплы сложены ювенильными оскольчатыми пористыми шлаковыми частицами и небольшим количеством (не более 10 об. %) обломков минералов – оливина, клинопироксена и плаггиоклаза. Облик ювенильных шлаковых частиц показан на рис. 2. Большинство частиц на

**Таблица 1.** Представительные анализы состава вулканических стекол в продуктах вершинного извержения и побочного прорыва им. Г.С. Горшкова вулкана Ключевской в 2020–2021 гг.

Период извержения		Вершинное извержение, ноябрь 2020 г.																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Компонент/номер анализа																			
SiO <sub>2</sub>	56.09	56.24	56.37	56.24	56.52	56.54	56.86	56.68	56.71	56.84	56.96	57.03	57.09	57.16	57.28	57.33	57.53	58.23	
TiO <sub>2</sub>	1.89	1.81	2.01	2.00	1.95	2.06	2.08	2.02	2.07	2.03	1.91	2.16	2.15	1.89	2.06	1.90	1.92	2.29	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.52	14.35	13.69	13.66	13.57	13.48	13.14	13.89	13.52	13.93	14.17	13.46	13.57	13.72	13.07	13.97	13.73	14.26	
FeO*	10.36	10.51	11.32	11.29	11.38	11.30	11.35	10.95	11.33	10.98	10.94	11.01	11.12	11.04	12.99	10.29	11.00	12.79	
MgO	3.54	3.46	3.53	3.52	3.59	3.37	3.56	3.74	3.38	3.75	3.70	3.42	3.60	3.72	2.84	3.61	3.63	2.03	
CaO	7.12	7.12	6.91	6.90	6.98	6.84	6.80	6.96	6.86	6.98	6.97	6.75	6.91	6.99	5.95	6.99	6.56	4.19	
Na <sub>2</sub> O	4.43	4.44	3.97	3.96	3.86	3.97	3.73	3.37	3.98	3.38	3.39	3.69	3.41	3.53	3.45	3.83	3.58	3.08	
K <sub>2</sub> O	1.72	1.73	1.86	1.86	1.90	1.85	1.90	1.75	1.86	1.75	1.69	1.78	1.82	1.63	1.93	1.57	1.77	2.69	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.34	0.35	0.35	0.24	0.29	0.36	0.36	0.29	0.37	0.26	0.40	0.34	0.32	0.42	0.25	0.27	0.45	
Период извержения																			
Вершинное извержение, декабрь 2020 г.																			
Компонент/номер анализа																			
SiO <sub>2</sub>	55.87	56.55	56.69	56.76	56.83	56.91	56.96	57.07	57.14	57.22	57.34	57.42	57.48	57.52	57.60	57.71	58.12	58.49	
TiO <sub>2</sub>	1.76	2.00	1.85	1.81	1.86	1.85	1.97	1.94	2.24	2.03	1.96	1.93	1.97	1.95	1.86	2.00	1.97	2.56	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.28	13.64	13.89	14.00	13.92	13.86	13.52	13.26	13.09	13.77	13.36	13.60	13.13	13.85	13.39	13.32	13.73	12.23	
FeO*	11.64	10.97	10.63	10.70	10.66	10.73	11.03	11.25	11.05	10.91	11.12	10.74	9.99	10.77	11.03	11.35	10.53	12.71	
MgO	2.62	3.71	3.83	3.77	3.84	3.62	3.60	3.67	3.46	3.75	3.42	3.72	4.43	3.29	3.65	3.49	3.14	2.26	
CaO	8.08	6.98	7.01	7.12	7.03	7.14	7.11	7.07	6.61	7.13	6.76	6.85	7.48	6.84	6.90	6.74	6.37	5.19	
Na <sub>2</sub> O	3.98	3.75	3.80	3.96	3.81	3.89	3.84	3.68	3.79	3.27	3.72	3.70	3.63	3.70	3.59	3.25	4.05	3.65	
K <sub>2</sub> O	1.45	1.72	1.69	1.62	1.69	1.68	1.78	1.75	1.90	1.63	1.9	1.73	1.6	1.80	1.73	1.83	1.80	2.41	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.39	0.36	0.28	0.36	0.33	0.19	0.31	0.39	0.30	0.41	0.31	0.31	0.27	0.24	0.31	0.27	0.51	
Период извержения																			
Побочный прорыв им. Г.С. Горшкова, март 2021 г.																			
Компонент/номер анализа																			
SiO <sub>2</sub>	58.52	58.74	58.86	59.04	59.14	59.21	59.39	59.51	59.62	60.02	60.13	60.33	60.46	60.58	60.72	61.04	61.22	61.97	
TiO <sub>2</sub>	2.60	2.40	2.53	2.47	2.37	2.70	2.55	2.52	2.31	2.38	2.32	2.13	2.48	2.26	2.33	2.27	2.17	2.13	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.66	12.76	12.31	12.33	12.41	12.81	12.93	12.74	12.73	12.78	12.86	12.82	11.99	12.09	13.04	12.86	13.07	12.82	
FeO*	12.19	12.56	12.69	12.37	12.19	11.71	11.37	11.64	11.26	10.94	10.65	10.88	11.21	10.78	10.67	10.44	10.48	9.16	
MgO	1.91	2.01	1.89	1.90	1.84	1.73	2.01	1.80	1.79	2.25	1.9	1.85	2.12	2.30	1.39	1.64	1.85	1.92	
CaO	5.43	5.13	4.99	5.26	5.01	5.42	5.39	5.00	5.38	5.54	5.38	5.54	5.12	5.45	4.98	5.32	4.57	5.04	
Na <sub>2</sub> O	3.58	3.43	3.73	3.64	3.85	4.12	3.66	4.30	4.43	3.68	4.22	4.25	3.95	3.68	4.66	4.27	4.60	4.53	
K <sub>2</sub> O	2.57	2.70	2.53	2.63	2.58	1.83	2.31	2.08	1.71	2.10	2.02	1.76	1.92	2.51	1.82	1.77	1.70	1.88	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.56	0.28	0.47	0.38	0.31	0.48	0.40	0.41	0.41	0.32	0.53	0.44	0.45	0.35	0.38	0.39	0.35	0.56	

Примечание. Все анализы пересчитаны на сумму оксидов 100%. Дефицит суммы для большинства анализов не превышал 2%.

Анализы № 4–5 и № 6–7 выполнены на одном участке образца при различном диаметре электронного пучка: 5 мкм для № 4 и № 6 и растром ~10 × 10 мкм для № 5 и № 7.



**Рис. 2.** Облик ювенильных пеплов, изверженных вулканом Ключевской в декабре 2020 г. а – общий вид образца; б – частица шлака с лейстами и зональным субвкрапленником плагиоклаза и микролитами клинопироксена; в – оскользящая частица стекла. *Pl* – плагиоклаз; *Cpx* – клинопироксен; *Gl* – стекло.

80–85 об. % состоят из стекла, в котором выделяются лейсты и единичные субвкрапленники (100–300 мкм) плагиоклаза (*Pl*,  $An_{70-52}$ ), а также немногочисленные микролиты клинопироксена (*Cpx*,  $Mg\#_{60-72}$ ) (см. рис. 2б) неправильных, часто скелетных, а иногда и дендритообразных форм. Субвкрапленники оливина имеют состав  $Fe_{70-77}$ . В пеплах встречаются также осколки чистого стекла без микролитов (см. рис. 2в). Такие особенности тейфы отражают быструю закалку частиц в процессе стромболианской активности вершинного кратера.

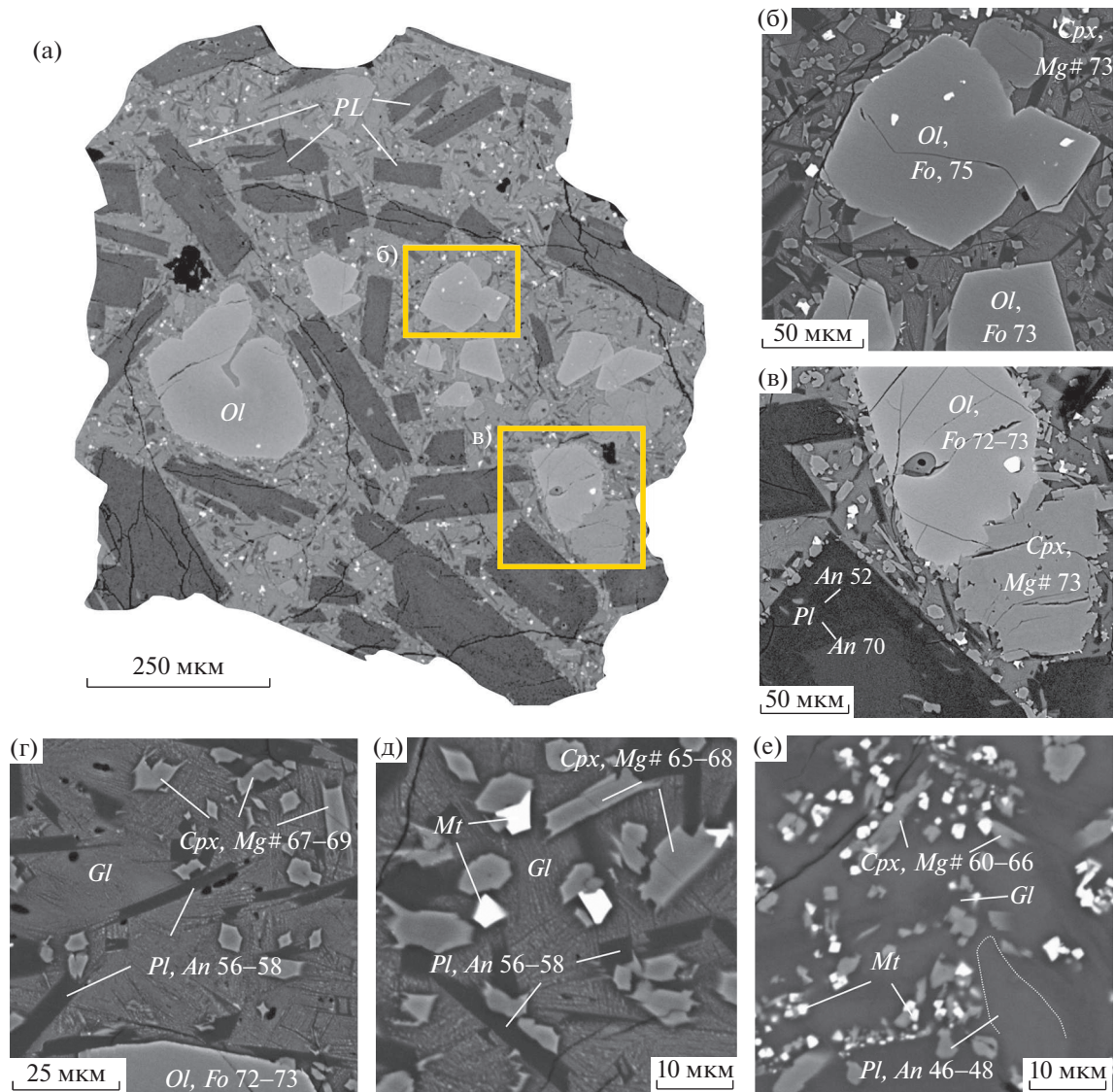
Фрагмент вулканической бомбы побочного прорыва им. Г.С. Горшкова макроскопически представляет собой черную стекловатую пористую породу с единичными субвкрапленниками плагиоклаза и еще более редкими зернами оливина. Химический состав фрагмента вулканической бомбы отвечает андезибазальту:  $SiO_2$  – 53.5,  $TiO_2$  – 1.11,  $Al_2O_3$  – 16.35,  $FeO^*$  – 9.34,  $MnO$  – 0.19,  $MgO$  – 6.61,  $CaO$  – 8.21,  $Na_2O$  – 3.12,  $K_2O$  – 0.98,  $P_2O_5$  – 0.21 (мас. %). Андезибазальты принадлежат известково-щелочной серии ( $FeO^*/MgO$  – 1.41), характеризуются умеренной магнезиальностью ( $Mg\# = Mg/(Mg + Fe) = 0.56$  мол. %) и относятся к глиноземистым  $15.29 \pm 0.55 > Al_2O_3 < 18.26 \pm 0.50$  (мас. %) разностям согласно петрохимической

классификации пород Ключевского вулкана [Арискин и др., 1995].

На изображении, полученном на сканирующем электронном микроскопе (рис. 3), видно, что порода вулканической бомбы состоит из лейст плагиоклаза ( $An_{70-52}$ ), субфенокристаллов оливина ( $Fe_{72-75}$ ) неправильных форм, иногда образующих сростки с клинопироксеном ( $Mg\#_{72-73}$ ). Основная масса породы вулканической бомбы раскристаллизована в большей степени по сравнению с основной массой частиц пеплов вершинного извержения, что связано с более медленным охлаждением магмы в процессе эффузивного излияния. Содержание стекла в основной массе породы вулканической бомбы составляет в среднем 30–40 об. %. В числе микролитов преобладают клинопироксен ( $Mg\#_{60-68}$ ) и плагиоклаз ( $An_{45-58}$ ), встречаются отдельные идиоморфные выделения магнетита (см. рис. 3б, в). В образце также присутствуют участки основной массы, резко обогащенные магнетитом (см. рис. 3г). Содержание стекла на таких участках снижается до 15–20 об. %.

#### Состав вулканических стекол

На рис. 4 показаны результаты анализа вулканических стекол в частицах пеплов вершинного из-



**Рис. 3.** Фрагмент вулканической бомбы начального периода активности прорыва им. Г.С. Горшкова.

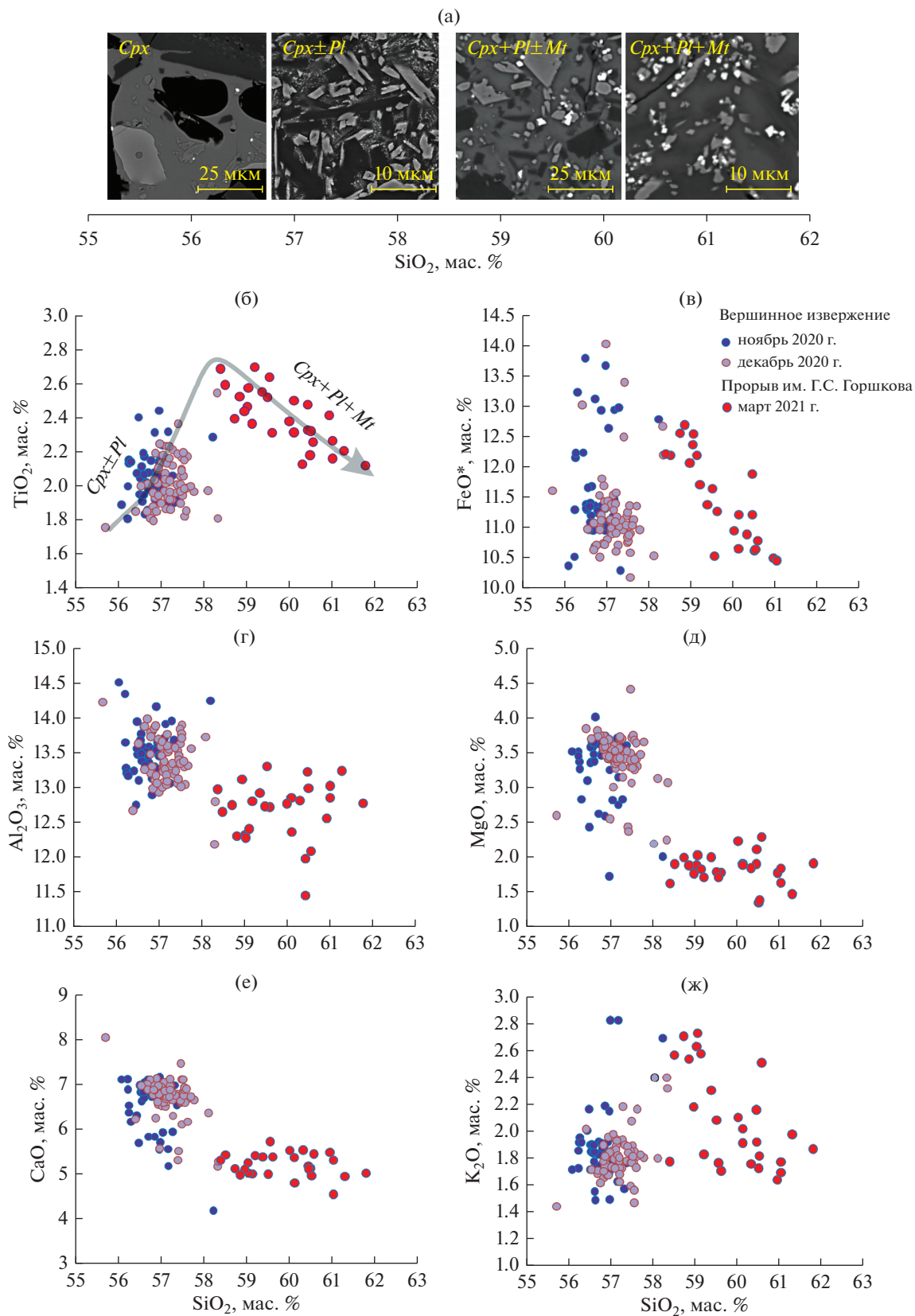
а – общий вид образца; б – субкрапленники оливина; в – сросток оливина и клинопироксена; г – общий вид основной массы образца; д – выделения клинопироксена, плагиоклаза и магнетита; е – участок основной массы с обильными выделениями магнетита.

*Ol* – оливин; *Pl* – плагиоклаз; *Cpx* – клинопироксен; *Mt* – магнетит; *Gl* – стекло.  
 $Fo_{Ol} = 100Mg/Mg + Fe^{2+}$ ;  $Mg\#_{Cpx} = 100Mg/Mg + Fe^{2+}$ ;  $An_{Pl} = 100Ca/Ca + Na + K$ .

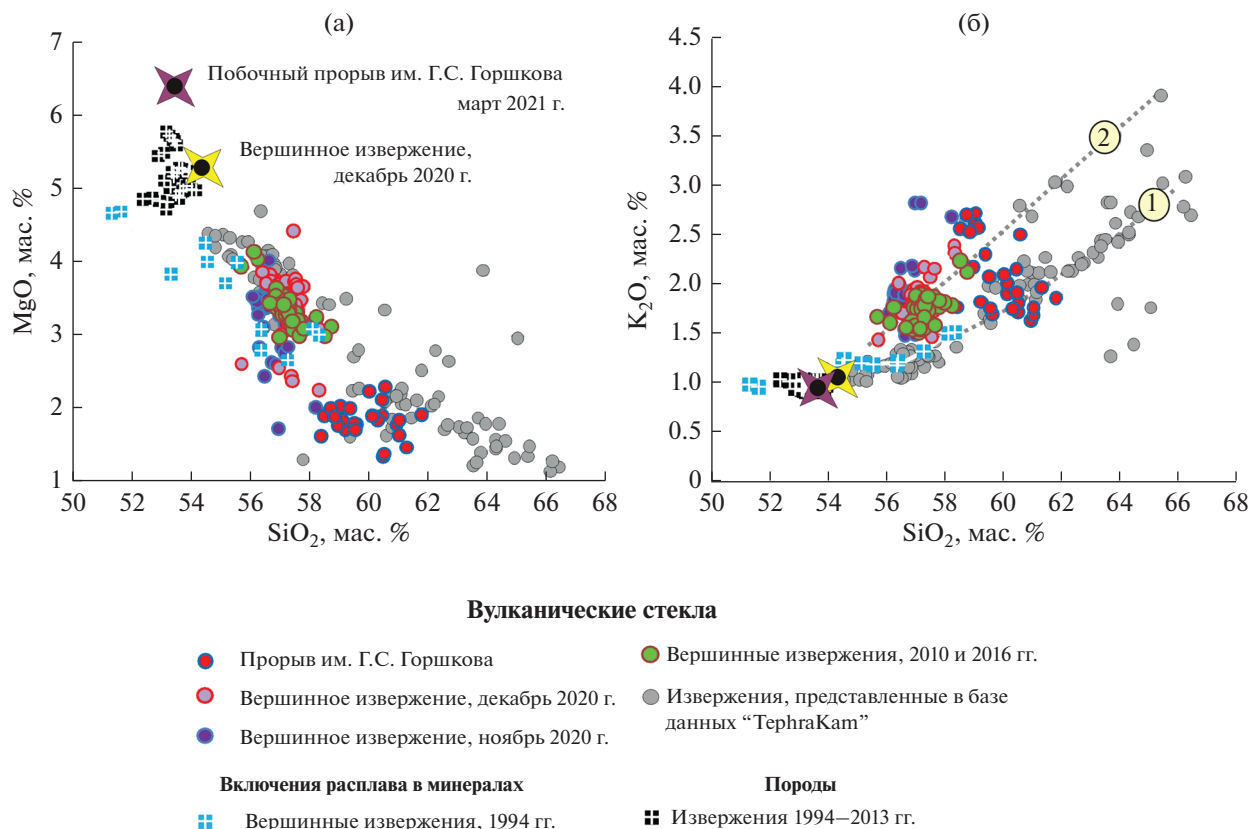
вержения и фрагмента вулканической бомбы начального этапа активности прорыва им. Г.С. Горшкова. Точки составов стекол формируют единые эволюционные тренды, отражающие степень раскристаллизации изученных частиц и последовательную смену популяций микролитов в ходе завершающих этапов кристаллизации андезитобазальтовой магмы. Содержание  $SiO_2$  в чистых стеклах частиц вершинного извержения составляет 55.7–57.0 мас. %, а в частицах с редкими микролитами клинопироксена увеличивается до 57.0–58.4 мас. %. В диапазоне содержаний  $SiO_2 \sim 58.2$ –58.4 мас. % составы стекол частиц вер-

шинного извержения сближаются с составами стекол наименее раскристаллизованных участков вулканической бомбы прорыва Г.С. Горшкова (см. рис. 4б–ж). В стеклах более раскристаллизованных фрагментов вулканической бомбы содержание  $SiO_2$  растет до 60 мас. % и достигает 62 мас. % на участках максимально обогащенных магнетитом (см. рис. 4а).

Поведение оксидов титана, алюминия, магния, железа и кальция (см. рис. 4б–е) отчетливо фиксирует смену последовательно кристаллизующихся популяций микролитов. С ростом содержания кремнекислоты до 58.4 мас. % остаточный



**Рис. 4.** Вариации облика и химического состава вулканических стекол в продуктах извержений вулкана Ключевской в 2020–2021 гг.: облик частиц, состав стекол которых соответствует различным интервалам содержаний  $\text{SiO}_2$  (а); распределение содержаний  $\text{TiO}_2$  (б),  $\text{FeO}^*$  (в),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (г),  $\text{MgO}$  (д),  $\text{CaO}$  (е),  $\text{K}_2\text{O}$  (ж) в зависимости от содержаний  $\text{SiO}_2$  в продуктах отдельных эруптивных эпизодов.



**Рис. 5.** Сравнение химического состава вулканических стекол в продуктах извержений 2020–2021 гг. с аналогичными данными для тефры вулкана Ключевской согласно базе данных TerraKam [Portnyagin et al., 2020]. Для сравнения показан также валовый состав пород, изверженных в 1994–2013 гг. [Bergal-Kuvikas et al., 2017] и состав природно-закаленных расплавленных включений в оливинах андезибазальтов, изверженных в 1994 г. [Хубуная и др., 2018]. Валовый состав тефры вершинного извержения и начального этапа активности прорыва им. Г.С. Горшкова показан по данным этой работы.

расплав интенсивно обедняется оксидами магния, кальция и алюминия, что соответствует кристаллизации популяции микролитов с резким преобладанием клинопироксена (см. рис. 4а). В этом же интервале содержаний  $\text{SiO}_2$  (от 55.7 до 58.4 мас. %) происходит небольшой рост содержаний  $\text{TiO}_2$  и резкое накопление  $\text{FeO}^*$  (см. рис. 4б, в). Подобное поведение оксидов титана и железа неоднократно было описано при рассмотрении природных и модельных трендов эволюции известково-щелочных и толеитовых расплавов [Grove, Baker, 1984; Арискин, Бармина, 2000 и др.] и объяснялось небольшой пропорцией магнетита в составе кристаллизующихся минеральных ассоциаций [Almeev et al., 2013]. При содержании  $\text{SiO}_2 \sim 58.2\text{--}58.4$  мас. % наблюдается перегиб трендов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{FeO}^*$  (см. рис. 4б, в), обозначающий стабилизацию магнетита на ликвидусе. Обильное выделение магнетита на завершающем этапе кристаллизации привело к резкому обеднению остаточного расплава  $\text{TiO}_2$  и  $\text{FeO}^*$  и росту содержания кремнекислоты от 58.4 до 62 мас. %. В этом же диапазоне содержания крем-

некислоты меняется поведение оксидов магния, кальция и алюминия (см. рис. 4г–е), что отвечает совместной кристаллизации микролитов плагиоклаза, клинопироксена и магнетита. Поведение оксида калия в зависимости от содержания кремнекислоты сходно поведению титана, однако тренд составов менее отчетлив (см. рис. 4ж).

#### *Сравнение состава вулканических стекол тефры извержений 2020–2021 гг. с продуктами предшествующих этапов активности*

Сравнение составов вулканических стекол в тефре вершинного извержения и начального этапа активности прорыва им. Г.С. Горшкова с продуктами предшествующих извержений показано на рис. 5. Полученные нами составы стекол продолжают тренд эволюции составов природно-закаленных включений расплава в оливинах андезибазальтов более ранних вершинных извержений (см. рис. 5) по данным [Хубуная и др., 2018], что позволяет рассматривать продукты, изверженные в 2020–2021 гг. в качестве производных гли-



ноземистой андезибазальтовой магмы, типичной для вершинных и большинства побочных извержений Ключевского вулкана [Озеров, 2019]. Составы стекол вершинного извержения идентичны составам стекол в тefре предшествующих эпизодов активности вулкана в 2010 и 2016 гг. (см. рис. 5), представленных в базе данных TephraKam [Portnyagin et al., 2020].

Примечательно, что составы стекол двух недавних извержений, также как и более ранних эпизодов эруптивной активности, согласно [Portnyagin et al., 2020] обнаруживают гетерогенность по содержанию калия и формируют два тренда по отношению к содержанию  $\text{SiO}_2$  (см. рис. 5). Первый тренд находится на продолжении тренда эволюции составов природно-закаленных расплавленных включений по данным [Хубуная и др., 2018], второй отличается более резким накоплением содержания калия с ростом  $\text{SiO}_2$ . Подобная гетерогенность нередко выявляется при анализе остаточных стекол, а также включений расплава в минералах и объясняется эффектами малоуглубинной декомпрессионной кристаллизации [Devine, Rutherford, 2014] или же связывается с процессом смешения магм [Humphreys et al., 2010]. Эффект малоуглубинной декомпрессионной кристаллизации появляется за счет фракционирования популяции микролитов (плагиоклаза и/или пироксенов), вследствие чего остаточный расплав резко обогащается калием—элементом, несовместимым или умеренно совместимым при кристаллизации данных фаз. На примере полученных нами данных видно, что более интенсивное накопление калия характерно для стекол тех частиц, где среди микролитов резко преобладает клинопироксен, а плагиоклаз находится в подчиненном количестве (см. рис. 4). Согласно базе данных коэффициентов распределения для минералов GERM (<https://kdd.earthref.org/KdD/search>), клинопироксен имеет на порядок меньший коэффициент распределения калия с базальтовым и андезибазальтовым расплавами ( $Cpx_{\text{KD/K}} = 0.0n-0.00n$ ) по сравнению с плагиоклазом ( $Pl_{\text{KD/K}} = 0.n$ ). Наиболее вероятно, кристаллизация популяции микролитов, в которой доминирует клинопироксен, является причиной обогащения группы вулканических стекол калием. Альтернативное объяснение, предполагающее влияние процесса смешения магм, требует дальнейших петрологических исследований, которые могут включать детальное изучение состава и зональности породообразующих минералов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулканические стекла в продуктах вершинного извержения и начального этапа активности побочного прорыва им. Г.С. Горшкова показывают закономерные вариации состава, отражающие

смену популяций микролитов в ходе завершающих этапов кристаллизации андезибазальтовой магмы. Различная степень кристалличности частиц отражает разную скорость охлаждения магмы в процессе извержения — быструю закалку в случае стромболианской активности вершинного кратера и более медленное охлаждение при эффузивном излиянии прорыва им. Г.С. Горшкова. Единый тренд эволюции составов для вулканических стекол двух эруптивных эпизодов и составов расплавленных включений в породах более ранних этапов активности позволяет рассматривать продукты извержений 2020–2021 гг. в качестве производных глиноземистой андезибазальтовой магмы, типичной для вершинных и большинства побочных извержений Ключевского вулкана. Идентичность состава стекол в продуктах вершинного и побочных извержений в 2020–2021 гг. и предшествующих эруптивных эпизодов в 2010 и 2016 гг. указывает на постоянный состав андезибазальтовой магмы, питающей современные извержения вулкана.

Опыт нашей работы показывает, что анализ вулканического стекла в последовательных порциях изверженного материала может быть использован как инструмент петрологического мониторинга. Сопоставление с базой данных TephraKam, где содержатся данные по составу стекол для всех активных вулканов Камчатки, позволяет оперативно сравнивать состав пород текущих извержений с продуктами более ранних этапов активности.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в соответствии с госзаданием по теме ИВиС ДВО РАН № 0282-2019-0004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. № 5. С. 496–521.
- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 363 с.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2020–2021 гг. и их опасность для авиации // Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 25–28.
- Горбач Н.В., Плечова А.А., Маневич Т.М. и др. Состав вулканических пеплов и динамика извержения вулкана Жупановский в 2013–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 3–20. <https://doi.org/10.7868/S020303061803001X>
- Кириянов В.Ю., Соловьева Н.А. Изменение вещественного состава вулканических пеплов в результате грави-

- тационной эоловой дифференциации // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 10–19.
- Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: ГЕОС, 2019. 306 с.
- Озеров А.Ю., Гирина О.А., Мельников Д.В. и др. Вулкан Ключевской: новый побочный прорыв им. Г.С. Горшкова, 2021 г. (п-ов Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 2. Вып. 49. С. 5–9.
- Пономарева В.В., Портнягин М.В., Мельников Д.В. Состав тефры современных (2009–2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 49. С. 5–9.
- Портнягин М.В., Наумов В.Б., Миронов Н.Л. и др. Состав и эволюция расплавов извержения 1996 г. в Карымском озере (Восточная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2011. № 11. С. 1153–1178.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев В.А., Хубуная В.С. К вопросу о магматических очагах вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 14–29. <https://doi.org/10.7868/S0203030618020025>
- Almeev R.R., Ariskin A.A., Kimura J.I., Barmina G.S. The role of polybaric crystallization in genesis of andesitic magmas: phase equilibria simulations of the Bezymianny volcanic subseries // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2013. V. 263. С. 182–192.
- Amosova A.A., Panteeva S.V., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L. Determination of major elements by wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry in igneous rocks from the same fused sample (110 mg) // Spectrochim. Acta. Part B. 2016. V. 122. P. 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.06.001>
- Bergal-Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani T. et al. A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2017. V. 172(5). P. 35.
- Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. № 47. P. 125–139. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1876>
- Devine J.D., Rutherford M.J. Magma storage region processes of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Eds G. Wadge, R.E.A. Robertson, B. Voight // The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat from 2000 to 2010 // Geological Society. London. 2014. V. 39. P. 361–381. <https://doi.org/10.1144/M39.19>
- Grove T.L., Baker M.B. Phase equilibrium controls on the tholeiitic versus calc-alkaline differentiation trends // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1984. V. 89. № B5. С. 3253–3274.
- Humphreys M.C.S., Edmonds M., Christopher T., Hards V. Magma hybridisation and diffusive exchange recorded in heterogeneous glasses from Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37(19). L00E06.
- Jarosewich E., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference Samples for Electron Microprobe Analysis // Geostand. Newslett. 1980. V. 4. P. 43–47.
- Ponomareva V., Pendea I. F., Zelenin E. et al. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // Quaternary Science Reviews. 2021. V. 257. P. 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>
- Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth System Science Data. 2020. V. 12(1). P. 469–486. <https://www.earth-syst-sci-data.net/12/469/2020/essd-12-469-2020.html>

## Volcanic Glasses Composition of the 2020–2021 Eruptive Products from Summit Eruption and G.S. Gorshkov Flank Vent at Kliuchevskoi Volcano: Comparative Analysis and Interpretation

N. V. Gorbach<sup>1</sup>\*, T. M. Filosofova<sup>1</sup>, D. V. Melnikov<sup>1</sup>, and T. M. Manevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

\*e-mail: n\_gorbach@mail.ru

We present the results of the analysis of the volcanic glasses chemical composition from the products of the summit eruption and G.S. Gorshkov flank vent at Kliuchevskoi volcano in 2020–2021. The data on the chemical and mineral compositions of basaltic andesites produced at initial stage of the G.S. Gorshkov vent activity are given. The compositional variations of the volcanic glasses from summit and subsequent flank eruptions reflect the degree of the tephra particles crystallinity and the successive change of microlite populations during crystallization of a single parental magma. Comparison of the volcanic glasses chemistry from recently eruptions with similar data for the products of the preceding eruptive episodes in 2010 and 2016 shows their complete identity, that indicates the monotonic composition of the basaltic andesite magma feeding the modern volcanic eruptions.

**Keywords:** volcanic glass composition, Kliuchevskoi volcano, G.S. Gorshkov vent, tephra