

**ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ПИК САРЫЧЕВА В ГОЛОЦЕНЕ
(о. МАТУА, ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ): ГЕОХИМИЯ ТЕФРЫ**

А.В. Дегтерев¹, А.В. Рыбин¹, И.В. Мелекесцев², Н.Г. Разжигаева³

¹ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: d_a88@mail.ru

²ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бул. Пийпа 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006

³ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, ул. Радио 7, г. Владивосток, 690041

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

Представлены первые результаты тефрохронологических исследований вулкана Пик Сарычева на о-ве Матуа (Центральные Курильские острова) с реконструкцией его эруптивной истории в голоцене. На основании изучения распределения петрогенных оксидов и микроэлементов в образцах тефры, послойно отобранных из опорного разреза почвенно-пирокластического чехла о. Матуа, рассмотрен общий характер геохимической эволюции продуктов вулкана на протяжении голоценовой эпохи, проведена их типизация. Идентифицированы горизонты транзитных пеплов.

Ключевые слова: тефра, почвенно-пирокластический чехол, голоцен, вулкан, геохимия, транзитные пеплы, Пик Сарычева, Курильские острова.

ВВЕДЕНИЕ

Тефрохронология является надежным инструментом для проведения палеовулканологических и палеогеографических реконструкций с высоким временным разрешением непосредственно в вулканических районах [3, 9, 16, 27 и др.] и за их пределами [18, 31 и др.]. К настоящему времени проведение тефрохронологических исследований не ограничивается работами в аэральных условиях. Изучаются осадочные записи из морских бассейнов [13, 28 и др.]. Повышение требований к уровню детальности исследований привело к появлению нового направления – криптитефрохронология.

На Камчатке тефрохронологические исследования с целью реконструкции истории эруптивной деятельности действующих и потенциально активных вулканов проводятся с начала 1970-х годов. За это время реконструирована история активности большинства голоценовых вулканов полуострова, для наиболее опасных из них составлен и научно обоснован долгосрочный прогноз. Кроме того, создана региональная тефростратиграфическая шкала, включающая обширный набор изохрон, позволяющих проводить высокоточные палеорекострукции [3, 9, 16, 27 и др.].

В отличие от Камчатки, территория Курильских островов в этом отношении изучена слабо: исследованиями по реконструкции вулканической активности затронута лишь южная (Кунашир, Итуруп) и северная (Онекотан, Парамушир) оконечности Курильской островной дуги [9, 12]. Наиболее существенным пробелом остаются Центральные Курилы – удаленная и труднодоступная группа островов, исследование которой начато только в последние годы, по большей части благодаря экспедициям Курильского Биокомплексного проекта [<http://depts.washington.edu/ikip/index.shtml>].

Мощное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Пик Сарычева (о. Матуа, Центральные Курилы) в июне 2009 г. инициировало начало специальных тефрохронологических и геолого-вулканологических работ, направленных на реконструкцию эруптивной истории вулкана в голоцене [6, 7].

В силу необитаемости и удаленности населенных пунктов от острова (более 300 км) опасности для наземных объектов извержение не представляло. Однако для авиатранспорта, воздушные коридоры которого пролегают в непосредственной близости от вулкана, оно представляло реальную угрозу (рис. 1). Оперативные действия Сахалинской группы реакти-

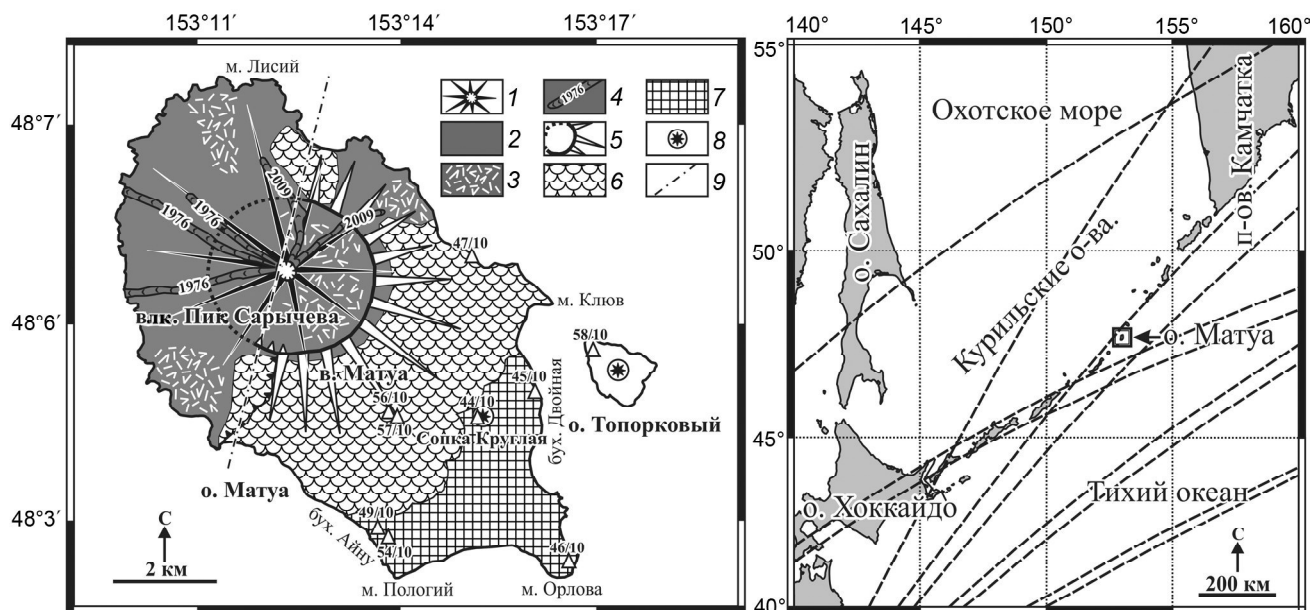


Рис. 1. Геологическая схема влк. Пик Сарычева.

1 – позднеголоценовая постройка влк. Пик Сарычева; 2 – отложения связанные с деятельностью вулкана Пик Сарычева (пирокластический материал и лава); 3 – отложения пирокластических потоков и тefры (участки наибольших скоплений); 4 – лавовые потоки извержений 1976 и 2009 гг.; 5 – постройка влк. Матуа (сплошной линией показаны установленные границы кальдеры, пунктиром – предполагаемые); 6 – отложения связанные с деятельностью влк. Матуа (преимущественно лавы); 7 – фундамент; 8 – прочие эруптивные центры; 9 – плоскость сброса по [4]. Треугольники с номерами – изученные разрезы ППЧ. На врезке - положение о. Матуа в системе Курильской островной дуги (пунктиром показаны международные авиалинии, проложенные в непосредственной близости от вулкана).

рования на вулканические извержения (SVERT), действовавшей в сотрудничестве со специалистами Аляскинской вулканологической обсерватории (AVO), минимизировали вероятность негативных последствий для авиации [29].

Учитывая высокую активность и эксплозивный характер деятельности влк. Пик Сарычева, крайне актуальным представляется вопрос оценки будущей вулканической опасности. Его решение предполагает изучение эруптивной истории вулкана за последние тысячи лет и определение современного этапа его активности. Ключевую роль при этом играют тefрохронологические исследования [3, 9 и др.].

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭРУПТИВНОЙ ИСТОРИИ ВЛК. ПИК САРЫЧЕВА

Действующий влк. Пик Сарычева (48.092°N, 153.20°E, абс. выс. 1446 м) занимает северо-западную часть о. Матуа, расположенного в центральной части Курильской островной дуги (рис. 1). Вулкан построен по типу Сомма-Везувий и состоит из плейстоценового влк. Матуа с вершинной кальдерой и молодого конуса Пик Сарычева (рис. 1). Остатки постройки влк. Матуа к настоящему времени сохрани-

лись лишь в юго-восточной части острова. Предполагается, что его северо-западная часть опущена по плоскости сброса [4] (рис. 1). Фундаментом вулканических построек выступают слабодислоцированные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы, возраст которых, по данным К-Аг-датирования составляет ~1.61 млн. лет [20].

Голоценовая эруптивная история вулкана Пик Сарычева предварительно подразделена на 3 главных этапа [2, 6, 17]: (1) кальдерообразующий (поздний плейстоцен-ранний голоцен), (2) “андезитовый” (большая часть голоцена) и (3) “андезибазальтовый” (~500 л.н. – настоящее время).

В течение первого этапа происходило формирование кальдеры влк. Матуа диаметром ~3.5 км, сопровождаемое массовым выбросом кислой пирокластики. На втором этапе голоценовой истории вулкана эруптивные центры, вероятно, располагались в пределах образованной кальдеры. По причине недостаточной обнаженности достоверно установить морфологию и тип вулканического аппарата, действовавшего на этом этапе, крайне затруднительно. Основываясь на особенностях развития современных вулканов Курило-Камчатского региона можно предположить, что это были экстрезивные образования. Активность

вулкана во время “андезитового” этапа характеризовалась напряженной эксплозивной деятельностью: произошло ~40 извержений разной силы, из них четыре может быть отнесено к разряду катастрофических. Заключительный этап голоценовой эруптивной истории связывается с началом роста внутрикальдерного конуса – Пик Сарычева. По результатам радиоуглеродного датирования погребенных почв, подстилающих горизонты стратифицированных шлаков, возраст современного действующего стратовулкана Пик Сарычева составляет ~500 лет [2].

В историческое время извержения влк. Пик Сарычева зафиксированы в 1765±5, 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976 и 2009 гг. [1, 4, 7, 15]. Последнее из них – мощное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана в июне 2009 г. – по ряду своих параметров было сопоставимо с крупнейшими извержениями вулканов Курильской островной дуги в XX веке [7, 29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предлагаемом сообщении представлены первые результаты изучения вещественного состава голоценовой тефры о. Матуа, проведенного с целью получения представления о характере геохимической эволюции влк. Пик Сарычева и идентификации горизонтов транзитных пеплов.

Материалы получены в ходе совместных экспедиционных работ, проведенных в августе 2010 г. сотрудниками институтов ДВО РАН: Института морской геологии и геофизики, Института вулканологии и сейсмологии, Тихоокеанского института географии [6]. Исследования проводились в рамках традиционной методики, разработанной О.А. Брайцевой, И.В. Мелекесцевым, Л.Д. Сулержицким и В.В. Пономаревой для реконструкции эруптивной деятельности действующих и потенциально активных вулканов Камчатки. Принципы методики изложены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях [3, 9, 16, 27]. Ведущая роль в исследованиях была отведена изучению тефры, отложения которой, представляя собой последовательную и практически непрерывную запись большинства эруптивных событий из жизни вулкана, позволяют произвести детальное изучение истории эруптивной деятельности и геохимической эволюции вулкана.

Всего в ходе полевых исследований было изучено более 10 разрезов почвенно-пирокластического чехла (ППЧ), сформированного в обрамлении влк. Пик Сарычева и покрывающего юго-восточную часть о. Матуа (рис. 1). По результатам радиоуглеродного датирования, выполненного на факультете

географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета, было установлено, что ППЧ о. Матуа имеет голоценовый возраст [2]. В качестве опорного для изучения вещественного состава был выбран разрез (зачистка) в бух. Двойная (№ 45/10, координаты: 48°04.155' с.ш., 153°16.046' в.д.). В нем зафиксирована полная голоценовая летопись эксплозивной активности влк. Пик Сарычева и найдено наибольшее количество горизонтов тефры (свыше 50) (рис. 2).

В позднеголоценовой части разреза идентифицировано два горизонта транзитных пеплов (СКг и Us), которые на территории Центральных Курил, и в частности о. Матуа, ранее были выделены японскими исследователями [24, 25] (рис. 2). Первый из них представлен маркирующим пеплом СКг (~2400 л.н.). Его предполагаемый источник находился на о. Итуруп. Второй относится к кальдерообразующему извержению влк. Ушишир (~1900 л.н.). [24, 25]. В среднеголоценовой части разреза авторами обнаружены горизонты тефры (№ 44а, 60, 62), геохимические характеристики которых также позволяют предположить, что их источник находился за пределами о. Матуа (рис. 2).

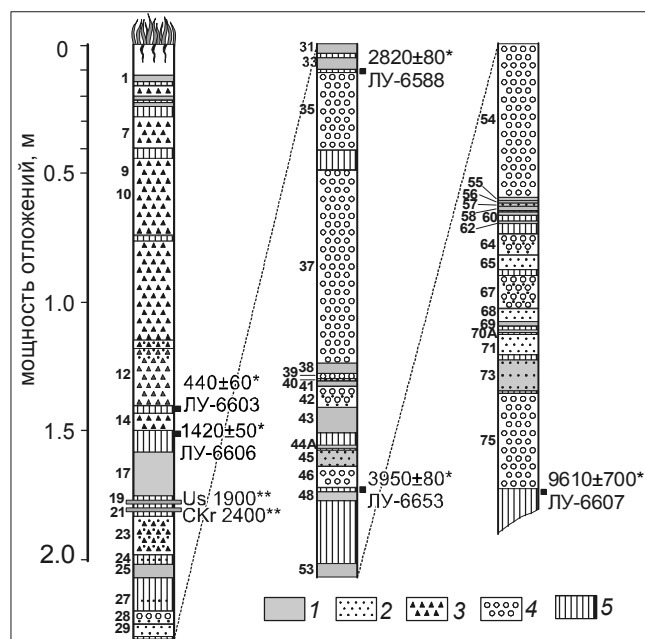


Рис. 2. Опорный разрез почвенно-пирокластического чехла о. Матуа (№ 45/10).

1 – тонкий пепел; 2 – грубый пепел; 3 – вулканический гравий и лапилли преимущественно основного состава; 4 – гравий и лапилли среднего и основного состава; 5 – погребенные почвы и супеси. Справа на колонке показаны места отбора образцов и их номер, слева – радиоуглеродный (^{14}C) возраст по данным [2]. Примечание: * – ^{14}C -даты из [2], ** – калиброванный возраст для пеплов Us и СКг по [24, 25].

Химический состав тефры был изучен в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Определение содержаний H_2O , п.п.п., SiO_2 выполнено методом гравиметрии аналитиком В.Н. Каминской, микроэлементы – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500Duo (Thermo Electron Corporation, США) аналитиками Г.И. Горбач, Е.А. Ткалиной, Н.В. Хуркало.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тефра влк. Пик Сарычева

Основным источником тефры о. Матуа являлся влк. Пик Сарычева, действовавший на протяжении всего голоцена. ППЧ, образованный горизонтами его пирокластики, наилучшим образом сохранился в южной части острова, благодаря уплощенному рельефу. Средняя мощность ППЧ, сформированного в результате посткальдерной голоценовой активности влк. Пик Сарычева составляет около 6 м.

Тефра влк. Пик Сарычева представлена несколькими разновидностями. Позднеголоценовая тефра – это преимущественно темно-коричневые и коричневые дробностратифицированные шлаки и темно-серые вулканические пески. Ранне- и среднеголоценовая тефра подразделяется на три подтипа: 1 – мощные пачки из грязно-желтой пемзовидной пирокластики, представленной вулканическим гравием и лапилли, нередко с бомбами размером 5–10 см; 2 – темно-желтые и желто-коричневые вулканические пески, иногда с примесью вулканического гравия и лапилли; 3 – темно-серые и бежевые пеплы, состоящие преимущественно из алеврита и мелкозернистого песка. Тефра влк. Пик Сарычева, независимо от возраста, зачастую “загрязнена” резургентным материалом, представленным в основном угловатыми обломками эффузивов. Доля последнего порой значительно превышает количество ювенильного компонента. В отложениях тефры некоторых крупнейших голоценовых извержений влк. Пик Сарычева встречаются бомбы с гетеротакситовой текстурой, свидетельствующие о смешении магм контрастного состава.

По содержанию SiO_2 в хронологическом порядке слоев в изученном голоценовом разрезе выделено 4 группы тефры влк. Пик Сарычева: 1 – нижнеголоценовая, преимущественно андезитового и дацитового состава (слои № 55, 56, 57, 58, 64, 65, 67, 69, 75); 2 – нижнеголоценовая, исключительно базальтового состава (слои № 68, 70а, 71, 73); 3 – среднеголоценовая, преимущественно андезибазальтового и андезитового состава (слои № 14, 17, 23, 24, 25, 27, 28, 29,

31, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 53, 54); 4 – верхнеголоценовая, исключительно андезибазальтового состава (слои № 1, 7, 9, 10, 12). Слои тефры от удаленных источников, выделены в отдельные группы: 5 – установленные транзитные пеплы Us и СКг (слои № 19, 21); 6 – предполагаемый транзитный пепел влк. Райкоке (слой № 44а); 7 – предполагаемые транзитные пеплы, источники которых не установлены (слои № 60, 62).

По уровню содержания SiO_2 (здесь и далее – содержание петрогенных элементов дается в пересчете на 100% сухого вещества) изученные образцы тефры варьируют в диапазоне от базальтов (48.9 мас. %) до дацитов (65.4 мас. %) (табл.). Наиболее распространены андезибазальты и андезиты (рис. 3 а). На классификационной диаграмме K_2O-SiO_2 составы вулканических ложатся в поле умеренно-калиевой серии (рис. 3 б). По соотношению SiO_2-FeO^*/MgO образцы тефры влк. Пик Сарычева соответствуют породам толейтовой серии (рис. 3 в), за исключением образцов из первой группы. На диаграмме АФМ большинство фигуративных точек попадает в поле известково-щелочных пород, располагаясь вблизи границы, разделяющей эти серии (рис. 3 г).

С увеличением SiO_2 концентрации щелочей возрастают. Содержания когерентных элементов (Со и V) базальтовой тефре составляют соответственно 27–33 и 269–299 г/т, в андезитовой и дацитовой 7–13 и 90–143 г/т (рис. 4). Обратная картина характерна для большинства некогерентных элементов (рис. 5) и литофильных (LILE) (рис. 6). Концентрации Rb и Ba в базальтах составляют 9–10 и 151–212 г/т, в андезитах и дацитах 20–32 и 335–487 г/т – (рис. 6). Вариации Th и U несколько отклоняются от этой закономерности в отношении образцов базальтовой тефры, которые, несмотря на минимум SiO_2 , не являются наименее обедненными этими элементами (рис. 5).

Кроме того, исключение составляет Sr, имеющих обратную зависимость от содержания SiO_2 .

Спектры распределения нормированных значений микроэлементов в изученных образцах тефры проявляют типичные островодужные признаки: относительно высокие концентрации LILE и LREE (легких редкоземельных элементов), при характерных низких значениях HFSE (высокозарядных элементов) (рис. 7). Представленные данные хорошо согласуются с полученными в последнее время данными по геохимии четвертичных вулканических Курильской островной дуги [8]. Наблюдаемые незначительные вариации по уровню содержания микроэлементов в выделенных группах тефры отражают ее разный состав (рис. 3 а).

Таблица. Представительные анализы содержания петрогенных (мас. %) и микроэлементов (г/т) в образцах гейфры с о. Матуа.

Компоненты	1	7	9	10	23	28	35	38	41	54
SiO ₂	52.70	55.1	51.94	52.65	54.45	53.08	54.15	56.5	55.37	57.32
TiO ₂	0.94	0.93	0.97	0.97	0.87	0.90	0.85	0.78	0.75	0.66
Al ₂ O ₃	17.20	17.80	18.62	18.85	17.93	17.60	18.03	17.05	18.00	18.38
Fe ₂ O ₃	10.56	9.04	10.01	9.70	8.74	9.44	9.14	8.20	8.43	7.09
MnO	0.22	0.19	0.19	0.18	0.18	0.22	0.20	0.20	0.21	0.17
MgO	4.68	3.53	3.94	3.69	3.63	4.10	3.68	3.11	3.38	2.80
CaO	9.02	8.82	9.51	9.40	8.78	8.72	8.34	6.84	8.48	7.45
Na ₂ O	2.85	3.34	3.03	3.18	3.13	2.94	2.97	3.02	3.10	3.27
K ₂ O	0.94	1.07	0.97	1.06	0.96	0.88	1.00	1.11	0.96	1.34
P ₂ O ₅	0.18	0.27	0.16	0.17	0.26	0.33	0.28	0.22	0.32	0.16
H ₂ O [?]	0.70	0.10	0.36	0.26	0.54	0.89	0.64	1.02	0.31	0.10
П.п.п.	0.50	0.30	0.61	0.31	0.84	1.35	0.55	2.35	1.18	1.78
Сумма	100.49	100.21	100.15	100.25	100.05	100.12	99.54	100.19	100.16	100.37
Li	5.63	6.40	6.66	7.12	6.65	6.05	6.13	5.49	6.25	8.44
Be	0.48	0.52	0.58	0.57	0.63	0.49	0.55	0.60	0.59	0.59
Sc	28.3	24.42	27.44	25.37	29.27	29.30	23.13	18.65	18.82	15.56
V	336.1	243.70	299.2	278.6	250.60	279.20	236.70	173.40	179.40	191.8
Cr	5.79	9.67	31.46	15.98	17.04	6.56	5.58	6.63	5.42	8.95
Co	21.35	17.09	22.66	20.55	18.00	22.15	17.92	14.92	14.83	15.29
Ni	4.84	7.07	7.96	8.05	7.54	9.46	7.51	5.74	4.82	6.05
Cu	62.9	53.57	56.45	60.58	74.13	67.91	44.15	28.06	38.82	34.26
Zn	73.1	58.66	60.53	59.26	61.67	63.17	61.78	60.42	65.19	56.31
Ga	14.16	17.04	17.46	16.96	16.40	16.88	16.23	16.23	16.92	16.22
Rb	10.74	15.00	12.90	14.21	13.46	13.05	15.30	17.11	15.20	22.00
Sr	478.1	521.7	474.7	481.4	470.9	459.9	474.7	470.3	551.4	421
Y	19.18	23.04	23.31	24.70	22.96	21.01	20.34	19.14	20.09	17.93
Zr	54.68	68.99	60.57	65.48	67.46	62.76	68.06	76.04	71.23	82.86
Nb	1.12	1.46	1.27	1.41	1.37	1.31	1.40	1.67	1.49	1.61
Mo	0.99	1.18	2.02	1.64	1.70	1.32	1.12	1.30	1.04	1.27
Cd	0.14	0.14	0.17	0.17	0.14	0.11	0.15	0.16	0.16	0.13
Sn	0.62	0.61	0.66	0.68	0.60	0.62	0.58	0.84	0.52	0.57
Cs	0.77	1.04	0.84	0.93	0.98	0.91	1.04	1.14	1.06	1.41
Ba	184.38	274.7	208.8	228.5	253.8	242.1	270.4	326.1	285.8	314.6
La	6.41	8.29	7.12	7.79	8.22	7.65	8.50	9.02	9.53	9.50
Ce	15.82	20.92	18.14	18.03	20.27	18.66	20.43	20.61	23.01	21.55
Pr	2.43	3.01	2.61	2.82	2.93	2.69	2.86	2.76	3.36	2.71
Nd	11.82	14.51	12.96	14.50	14.06	13.27	13.99	13.02	15.63	11.88
Sm	3.22	3.81	3.62	3.98	3.90	3.52	3.61	3.29	4.10	3.02
Eu	1.18	1.28	1.19	1.29	1.19	1.13	1.10	1.19	1.27	0.99
Gd	3.85	4.21	3.98	4.32	4.34	4.03	3.98	3.43	4.28	3.22
Tb	0.61	0.67	0.63	0.68	0.69	0.62	0.62	0.56	0.63	0.50
Dy	3.81	4.47	4.20	4.45	4.44	4.11	3.86	3.59	4.01	3.36
Ho	0.84	0.92	0.86	0.89	0.92	0.81	0.82	0.76	0.84	0.67
Er	2.52	2.70	2.58	2.79	2.76	2.34	2.39	2.31	2.48	2.06
Tm	0.39	0.41	0.39	0.40	0.39	0.34	0.35	0.34	0.38	0.31
Yb	2.50	2.62	2.49	2.64	2.53	2.32	2.41	2.42	2.48	2.13
Lu	0.39	0.41	0.39	0.42	0.40	0.35	0.36	0.37	0.39	0.33
Hf	1.68	1.92	1.77	1.88	1.97	1.81	1.87	2.18	2.02	2.24
Ta	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.11
W	0.28	0.31	0.44	0.36	0.24	0.14	0.19	0.16	0.14	0.36
Pb	5.67	6.24	5.90	6.14	6.56	6.92	6.49	9.14	6.76	7.58
Th	1.20	1.36	1.38	1.56	1.33	1.29	1.54	1.75	1.62	2.40
U	0.41	0.53	0.64	0.66	0.51	0.54	0.61	0.69	0.63	0.97

Таблица. (Продолжение).

Компоненты	68	71	56	64	67	75	44а	62	19	21
SiO ₂	47.77	47.93	60.82	61.44	60.63	61.20	51.95	55.36	58.50	65.45
TiO ₂	0.76	0.69	0.48	0.54	0.52	0.44	0.72	0.65	0.46	0.58
Al ₂ O ₃	20.04	18.32	18.73	16.35	16.86	17.44	18.56	17.68	17.30	14.25
Fe ₂ O ₃	9.48	9.76	4.51	5.74	5.74	4.70	6.07	6.57	5.39	4.45
MnO	0.17	0.22	0.11	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.17	0.11
MgO	4.67	5.80	1.55	2.17	2.10	1.56	2.47	2.48	1.79	1.06
CaO	9.38	9.30	5.68	5.82	6.15	5.33	5.91	5.54	6.17	3.17
Na ₂ O	2.40	2.22	3.34	3.55	3.46	3.56	2.94	2.96	3.43	3.79
K ₂ O	0.58	0.58	1.46	1.49	1.46	1.59	1.57	1.17	0.61	1.18
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.10	0.18	0.20	0.22	0.32	0.20	0.12	0.12
H ₂ O [?]	2.2	1.44	0.53	0.89	0.66	0.71	2.96	2.46	1.22	1.45
П.п.п.	2.75	3.45	2.45	2.06	1.87	3.61	6.8	4.54	4.8	4.78
Сумма	100.20	99.70	99.66	100.23	99.62	100.31	100.09	99.57	99.96	100.40
Li	6.85	6.12	7.22	10.62	14.74	13.95	7.99	7.97	9.24	11.20
Be	0.64	0.60	0.73	0.79	1.06	1.02	0.82	0.67	0.48	0.42
Sc	34.69	38.16	10.24	12.00	13.80	9.40	17.97	17.05	12.5	16.8
V	283.60	269.20	116.1	122.10	140.70	90.08	146.00	143.90	69.3	89.5
Cr	104.10	38.19	1.37	8.33	9.75	9.49	15.51	7.06	2.71	4.92
Co	27.19	31.28	7.30	9.57	10.36	7.36	11.13	12.63	6.55	6.35
Ni	26.82	24.16	3.40	4.96	4.73	4.59	8.53	7.70	1.47	2.02
Cu	82.12	63.24	28.76	45.27	27.47	30.14	110.16	57.15	11.5	20.8
Zn	71.75	74.92	41.82	53.22	57.52	53.32	52.31	48.08	43.9	54.1
Ga	19.46	18.24	16.77	16.09	17.15	16.42	18.96	18.05	12.33	13.59
Rb	9.92	9.87	24.69	27.39	28.50	31.78	30.80	21.20	6.60	20.05
Sr	379.7	375.2	438.9	430	442.3	457.8	478.3	364.8	381.9	177.4
Y	15.11	17.30	14.09	17.04	16.81	14.76	29.61	22.19	17.00	37.42
Zr	62.21	50.27	76.13	96.92	93.46	79.20	97.25	84.19	58.71	134.73
Nb	1.40	1.09	1.80	2.08	2.06	2.32	2.33	1.91	0.97	1.52
Mo	0.82	0.70	1.28	1.26	1.29	1.36	1.20	1.06	1.09	2.28
Cd	0.14	0.15	0.14	0.10	0.11	0.17	0.16	0.12	0.21	0.12
Sn	0.84	0.50	0.52	0.51	0.44	0.49	0.70	0.71	0.44	1.04
Cs	0.74	0.70	1.50	1.78	1.77	1.90	1.99	1.68	0.75	1.68
Ba	200.0	213.0	432.2	434.3	417.5	458.5	517.7	360.4	138.7	303.0
La	6.39	7.56	13.64	11.23	10.98	12.74	18.53	11.33	4.53	8.43
Ce	14.04	14.84	24.99	24.57	23.64	27.96	42.79	25.89	12.21	24.04
Pr	2.11	2.14	3.04	3.21	2.95	3.24	6.30	4.23	1.60	3.41
Nd	9.89	9.81	12.24	13.73	12.58	13.25	29.07	21.06	8.45	16.55
Sm	2.61	2.57	2.70	3.08	2.80	2.84	6.55	6.76	2.26	4.92
Eu	0.86	0.88	0.92	1.04	0.95	0.89	1.55	1.66	0.92	1.17
Gd	2.59	2.82	2.69	3.39	2.85	2.79	6.82	5.82	2.78	6.10
Tb	0.42	0.47	0.39	0.51	0.43	0.39	0.94	0.86	0.46	1.08
Dy	2.74	2.96	2.55	3.12	2.75	2.60	5.70	5.23	2.94	7.21
Ho	0.56	0.58	0.50	0.66	0.59	0.55	1.18	0.99	0.65	1.60
Er	1.71	1.83	1.59	1.99	1.85	1.65	3.45	3.02	2.05	4.68
Tm	0.26	0.25	0.24	0.30	0.28	0.26	0.47	0.44	0.36	0.71
Yb	1.81	1.80	1.59	2.14	1.90	1.75	3.17	2.93	2.64	4.98
Lu	0.27	0.27	0.27	0.35	0.31	0.28	0.51	0.45	0.33	0.74
Hf	1.68	1.40	2.12	2.55	2.27	2.14	2.68	2.20	1.73	4.29
Ta	0.09	0.07	0.12	0.14	0.13	0.17	0.16	0.13	0.06	0.13
W	0.20	0.15	0.44	0.40	0.28	0.41	0.28	0.23	0.24	0.47
Pb	7.18	6.22	10.27	9.17	7.69	9.34	11.18	9.60	6.69	11.31
Th	1.76	1.53	2.72	3.14	2.88	3.63	4.98	2.31	0.68	2.10
U	0.57	0.56	1.16	1.06	1.03	1.25	1.62	0.92	0.31	0.82

Примечание. Номера образцов соответствуют горизонтам тефры, приведенным на рис. 2.

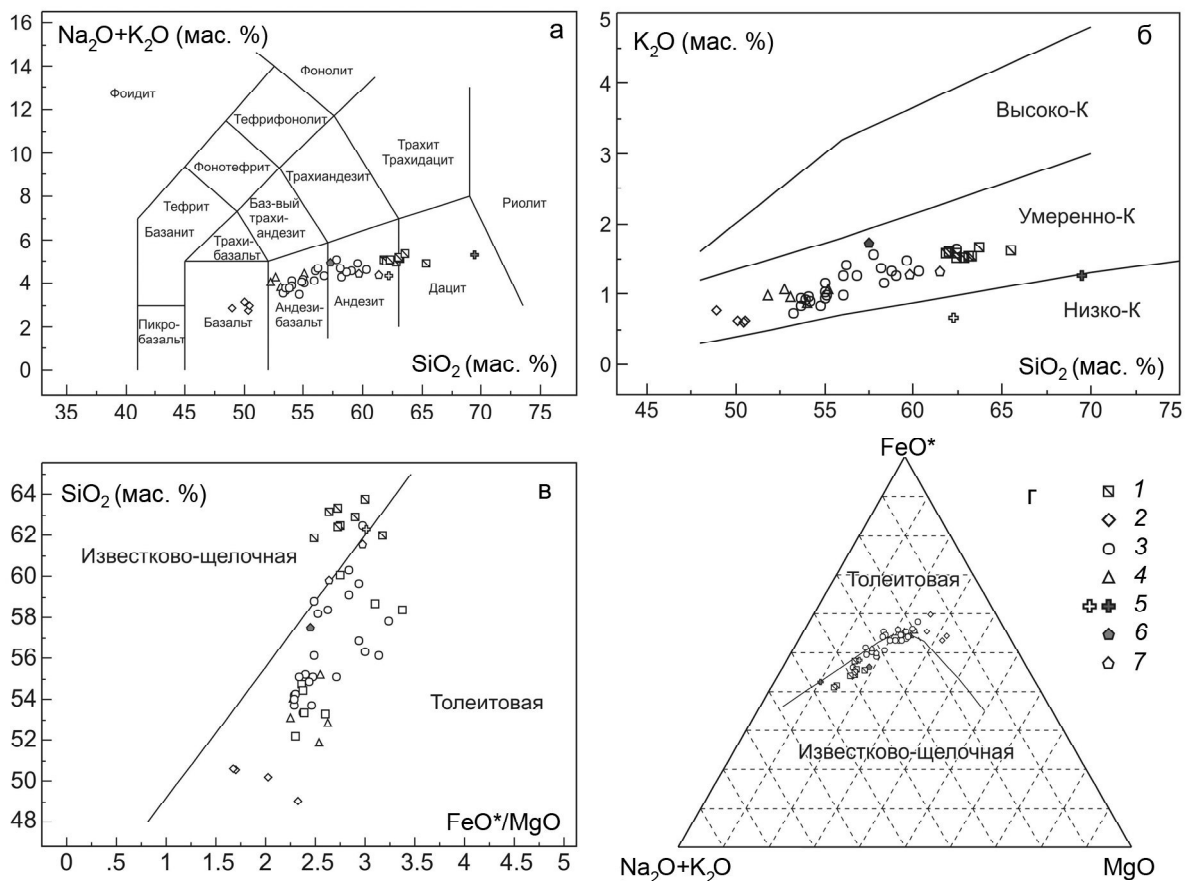


Рис. 3. Классификационные диаграммы для образцов голоценовой тефры о. Матуа. а – TAS-диаграмма ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$) для классификации и номенклатуры вулканических пород [21]; б – диаграмма $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ [26], с изменениями; в – диаграмма $\text{SiO}_2-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ [23]; г – AFM-диаграмма ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}^*-\text{MgO}$) [19]. 1–4 – тефра влк. Пик Сарычева, 5–7 – удаленная тефра, подробное описание в тексте.

Наибольшие вариации состава тефры от базальтов до дацитов выявлены для раннего и среднего голоцена (табл.). Обращает на себя внимание то, что тефра базальтового состава имеет весьма ограниченное распространение и является скорее исключением на общем фоне тефры андезит-дацитового состава. Единственный эпизод эруптивной активности вулкана с продуктами основного состава зафиксированный в раннем голоцене, представлен четырьмя слоями пеплов (слои № 68, 70а, 71, 73) с содержанием SiO_2 от 48.97 до 50.51 мас. % (рис. 2, 3 а). Под слоем 68 обнаружен горизонт пепла с содержанием SiO_2 – 65.52 мас. %, резко контрастирующим с рассматриваемыми образцами тефры, и в целом являющимся наиболее кислым из изученных образцов пирокластиков влк. Пик Сарычева (рис. 2, 3 а).

Поскольку возможность удаленного происхождения этих пеплов мы не рассматриваем, ввиду их значительной мощности и крупности, можно предположить, что столь значительная и резкая (десять

лет) смена вещественного состава была связана с возможными процессами перестройки вулcano-магматической системы после кальдерообразующего извержения. Не исключено также, что на этом этапе эруптивной истории влк. Пик Сарычева параллельно работал еще один эруптивный центр, имеющий общий с вулканом магматический источник. В любом случае, обоснование того или иного предположения требует отдельного исследования, выходящего за рамки настоящего сообщения.

Начиная с позднего голоцена, состав тефры влк. Пик Сарычева становится более однородным, преобладают андезибазальты. Подобная тенденция характерна и для продуктов современных извержений вулкана, содержание SiO_2 в которых составляет 52.3–55.9 мас. % [5].

Таким образом, на протяжении последних 10 тыс. лет вещественный состав эксплозивных продуктов влк. Пик Сарычева изменялся от андезитов и дацитов в раннем голоцене через андезиты и андезиба-

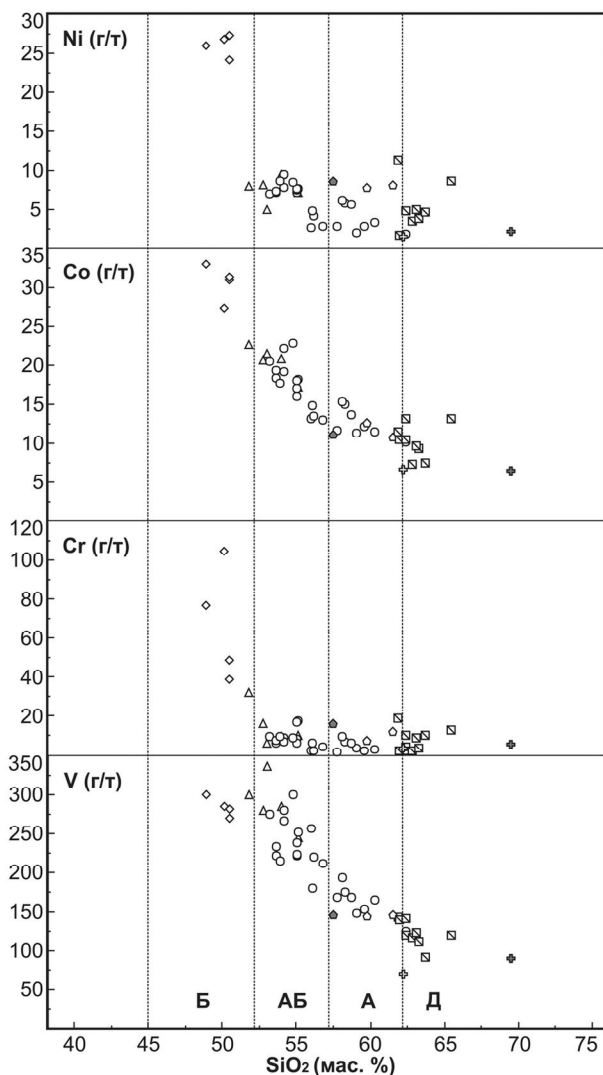


Рис. 4. Вариации концентраций когерентных элементов (г/т) в образцах тефры о. Матуа в зависимости от содержания SiO₂ (мас. %).

зальты, преобладавшие в среднем голоцене, до андезибазальтов – с позднего голоцена по настоящее время, включительно. В целом общий тренд эволюции вулканитов имеет антидромную направленность. При этом разновозрастные пепловые прослои образуют единый эволюционный тренд, свидетельствующий об их происхождении в результате единого процесса магматической дифференциации.

Транзитная тефра

В разрезе ППЧ обнаружено несколько горизонтов тефры, источники которых находились за пределами о. Матуа. Два из них – пепловые прослои с индексами СКг и Us – были выделены ранее на территории Центральных Курил, и в частности на о. Матуа [24, 25], еще один пепловый прослой (№ 44а) выявлен

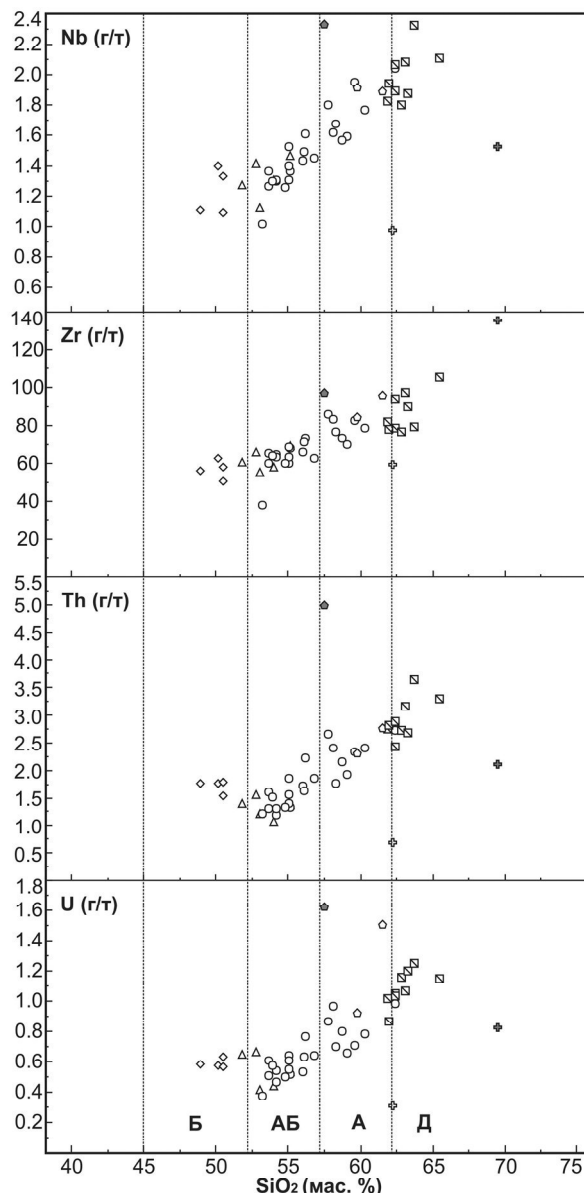


Рис. 5. Вариации концентраций некогерентных элементов (г/т) в образцах тефры о. Матуа в зависимости от содержания SiO₂ (мас. %).

впервые. Кроме того, не исключено транзитное происхождение пепловых прослоев № 60 и 62 (рис. 2).

Пеплы СКг (~2400 л.н.) и Us (~1900 л.н.) в разрезе ППЧ о. Матуа выделяются по светлой окраске. На фоне оливковых и коричнево-серых отложений пеплы бежевого, светло-желтого цвета создают определенный контраст с вмещающими отложениями. Мощность слоев, составляющая в среднем 1.0 (СКг) и 1.5–2.0 (Us) см, и гранулометрический состав, соответствующий алевриту с примесью пелитовой фракции, относительно выдержаны по всей площади острова. Яркие литологические признаки позволяют

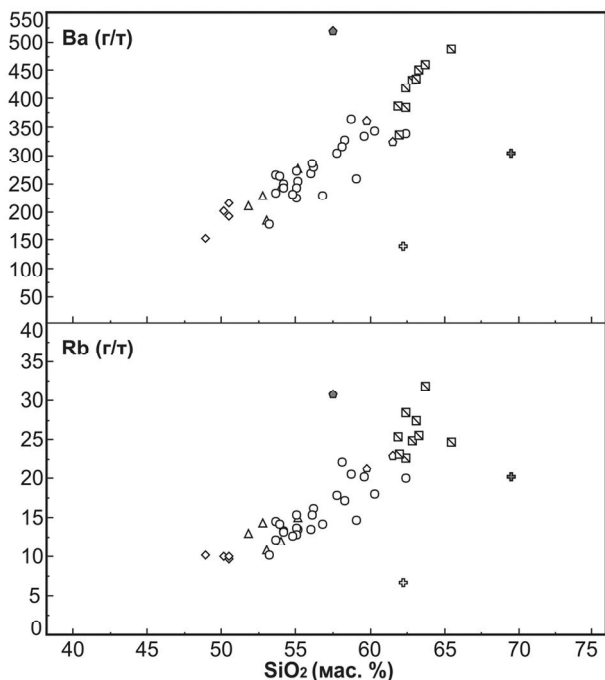


Рис. 6. Вариации концентраций крупноионных литофильных элементов (LILE) (г/т) в образцах тефры о. Матуа в зависимости от содержания SiO_2 (мас. %).

с легкостью диагностировать эти пеплы в большинстве разрезов, что делает их важнейшими маркерами верхнеголоценовых отложений Центральных Курил.

Геохимические характеристики пеплов СКг и Us также заметно отличаются от тефры влк. Пик Сарычева как по вариациям петрогенных оксидов, так и по распределению микроэлементов (табл.). Это проявлено в концентрациях LILE (рис. 6) и других некогерентных элементов (рис. 5): фигуративные точки образцов СКг и Us заметно “выбиваются” из общего роя точек тефры влк. Пик Сарычева. На диаграммах спектров нормированных значений элементов этих пеплов также выражены заметные отличия геохимических характеристик (рис. 7). Пепел СКг из всех проанализированных образцов является наиболее обогащенным MREE (средними редкоземельными элементами), HREE и HFSE (рис. 7). Пепел Us характеризуется минимальными концентрациями LILE, LREE, а также Ta, Nb, а на классификационной диаграмме его состав соответствует полю низкокальциевых пород (рис. 3 б).

В средней части разреза обнаружен прослой светло-желтого алевритового пепла (№ 44а), залегающий с неясным контактом между горизонтами погребенных почв. По совокупности геохимических признаков данный пепел также относится к разряду транзитных. На бинарных диаграммах зависимости

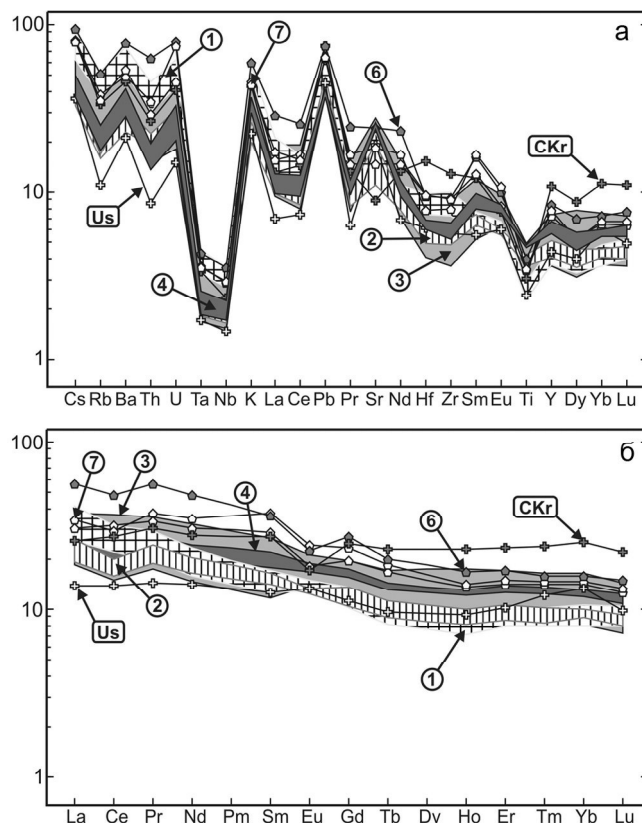


Рис. 7. Спектры распределения микро- и редкоземельных элементов (г/т) в образцах тефры о. Матуа, нормализованные к примитивной мантии (а) [22] и хондриту (б) [30], соответственно.

между LILE и SiO_2 фигуративная точка этого пепла отчетливо отделена от тефры влк. Пик Сарычева (рис. 6). Спектр распределения микроэлементов характеризуется высокими концентрациями нормированных значений LILE, LREE, MREE и HFSE (рис. 7). Суммарная концентрация REE этого пепла максимальна и составляет 127 г/т. В нем определено наибольшее содержание K_2O (1.73 мас. %), близкое к породам высококальциевой серии (рис. 3).

Представленные геохимические характеристики принесенных пеплов интерпретируются в связи с поперечной петрогеохимической зональностью Курильской островной дуги [8, 10, 11, 14]. Источником пепла Us является влк. Ушишир – наиболее “фронтальный” с характерными признаками деплетированности. Геохимические особенности горизонта тефры № 44а, выраженные в элементной “обогащенности”, позволяют предположить, что его источником был вулкан тыловой зоны. Один из вероятных эруптивных центров – действующий влк. Райкоке, расположенный в 20 км к северу от о. Матуа. К сожалению, история его активности не изучена, поэтому подтвер-

дить это на данный момент времени не представляется возможным.

Еще два пепловых прослоя (№ 60, 62) также, возможно, являются удаленными. По валовому составу они не имеют существенных различий с образцами тефры влк. Пик Сарычева. Вариации $LILE-SiO_2$ в них также не обнаруживают каких-либо отклонений от общего роя значений (рис. 6), некоторые отличия проявлены на микроэлементных спектрах в повышенных концентрациях $MREE$, отчетливо выраженном Eu -минимуме ($Eu/Eu^* = 0.75$ и 0.79 , соответственно). Представленных характеристик, однако, недостаточно для того, чтобы однозначно отрицать вероятность происхождения пепловых прослоев № 60 и 62 из местного источника – влк. Пик Сарычева.

ВЫВОДЫ

1. На основании комплексного изучения отложений тефры о. Матуа в голоценовой истории влк. Пик Сарычева выявлены периоды эруптивной деятельности, характеризующиеся различным составом эксплозивных продуктов, отражающих геохимическую эволюцию вулканического центра.

2. Преобладающий состав тефры голоценовых извержений влк. Пик Сарычева – андезибазальтовый и андезитовый. Общий же характер эволюции вещественного состава пирокластических продуктов вулкана свидетельствует о сокращении разнообразия пород во времени, что отражается в продуктах современного этапа его активности, представленных исключительно андезибазальтами.

3. Представленные данные по геохимии транзитных пеплов $СКг$ и Us демонстрируют их существенные отличия от местной тефры, проявляющиеся как в содержании петрогенных оксидов, так и в распределении микроэлементов.

4. На основании комплекса геохимических критериев в ППЧ о. Матуа впервые выделены горизонты тефры, происхождение которой может быть связано с удаленными источниками – соседними вулканами Курильской островной дуги.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны д.г.-м.н. С.В. Рассказову (ИЗК СО РАН, г. Иркутск) и д.г.-м.н. Ю.А. Мартынову (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток) за ряд ценных замечаний и пожеланий, способствовавших улучшению качества рукописи; экипажу учебного парусного судна “Надежда” и лично капитану С.А. Воробьеву за помощь в доставке вулканологического отряда на о. Матуа.

Исследования поддержаны грантами РФФИ (№ 10-05-00797-а) и ДВО РАН (№ 12-III-B-08-058).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1978. № 55. С. 35–40.
2. Арсланов Х.А., Мелекесцев И.В., Разжигаева Н.Г. и др. Возраст почвенно-пирокластического чехла и хронология вулканической активности на о. Матуа (Центральные Курилы) в голоцене // Материалы VII Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Т. 1. Апатиты; СПб.: РАН, Отд. наук о Земле; Комиссия по изуч. четвертич. периода; Геолог. ин-т КНЦ РАН, 2011. С. 43–45.
3. Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А. и др. Тейрохронологические исследования как метод изучения закономерностей циклического развития вулкана // Бюлл. вулканол. ст. 1978. № 54. С. 41–52.
4. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
5. Дегтерев А.В. Петрохимические особенности продуктов современных извержений вулкана Пик Сарычева, о. Матуа (Курилы) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 94–99.
6. Левин Б.В., Мелекесцев И.В., Рыбин А.В. и др. Экспедиция “Вулкан Пик Сарычева – 2010” (Курильские острова) // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 152–159.
7. Левин Б.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г. и др. Комплексная экспедиция “Вулкан Сарычева – 2009” (Курильские острова) // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 6. С. 98–104.
8. Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Кимура Дж.-И. и др. Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология. 2010. Т. 18, № 5. С. 1–25.
9. Мелекесцев И.В. Проблема выявления и диагностики действующих и потенциально активных вулканических образований Курило-Камчатской и Командорского звена Алеутской островных дуг // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 3–29.
10. Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 237 с.
11. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Г.П. Авдейко, А.Ю. Антонов, О.Н. Волынец и др. М.: Наука, 1992. 528 с.
12. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А. Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцене-голоцене. Владивосток: Дальнаука, 2006. 365 с.
13. Сахно В.Г., Деркачев А.Н., Мелекесцев И.В. и др. Вулканические пеплы в осадках Охотского моря: идентификация по микро- и редкоземельным элементам // Докл. РАН. 2010. Т. 434, № 2. С. 1–8.
14. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 239 с.
15. Шилов В.Н. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1960 году // Труды СахНИИ. 1962. Вып. 12. С. 143–149.
16. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. V. 47. P. 125–139.
17. Degterev A., Rybin A., Melekestsev I., Razjigaeva N.

- Quaternary eruptive history of Sarychev Peak volcano, Matua Island, the Kuriles // 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP-2011), August 25-30, 2011. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2011. P. 75–76.
18. Dugmore A.J., Larsen G., Newton A.J. Seven tephra isochrones in Scotland // *The Holocene*. 1995. V. 5. P. 257–266.
 19. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // *Can. J. Earth Sci.* 1971. V. 8. P. 523–548.
 20. Ishizuka Y., Nakagawa M., Baba A. et al. Along-arc variations of K-Ar ages for the submarine volcanic rocks in the Kurile Islands // 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP-2011), August 25–30, 2011. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2011. P. 279–280.
 21. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin, B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // *Journ. Petrol.* 1986. V. 27. P. 745–750.
 22. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
 23. Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Am. J. Sci.* 1974. V. 274. P. 321–355.
 24. Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kusugi A. KBP Report. 2008. 54 p.
 25. Nakagawa M., Baba A., Ishizuka Y. et al. Tephrostratigraphy of Kuril Islands: evaluation of Holocene eruptive activity of Kuril Arc // 6th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP-2009), June 22-26, 2009. Fairbanks, Alaska, 2011. P. 260.
 26. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline rocks from Kastamonu area, Northern Turkey // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976. V. 58. P. 63–81.
 27. Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // *Journal of Volc. and Geotherm. Res.* 2004. V. 136. P. 199–222.
 28. Rasmussen T.L., Wastegerd S., Kuijpers A. et al. Stratigraphy and distribution of tephra layers in marine sediment cores from the Faeroe Islands, North Atlantic // *Marine Geol.* 2003. V. 199. P. 263–277.
 29. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles // *Bull. Volcanol.* 2011. V. 73, N 4. P. 40–56.
 30. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes / A.D. Saunders and M.J. Norry (eds), *Magmatism in ocean basin* // *Geol. Soc. London. Spec. Pub.* 1989. V. 42. P. 313–345.
 31. Wastegerd S., Rundgren S., Schoning K. et al. Age, geochemistry and distribution of the mid-Holocene Hekla-S Kebister tephra // *The Holocene*. 2008. V. 18. P. 539–549.

A.V. Degterev, A.V. Rybin, I.V. Melekestsev, N.G. Razjigayeva

Explosive eruptions of the Sarychev Peak volcano in the Holocene (Matua Island, Central Kuril Islands): tephra geochemistry

The first results of tephrochronological researches of the Sarychev Peak volcano, the Matua Island, (Central Kuriles) are represented including the reconstruction of its eruptive history in the Holocene. Based on the study of the distribution of petrogenous oxides and microelements in the tephra sampled layer-by-layer from the reference section of soil-pyroclastic cover of Matua Island, a general trend of the geochemical evolution of the volcano products during the Holocene epoch is traced, their typification was made. The horizons of the transition ashes were identified.

Key words: tephra, soil-pyroclastic sequence, Holocene, volcano, geochemistry, transition ash, Sarychev Peak, Kuril Islands.