

УДК 555.21

СЕРА В ТЕФРЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ОПАЛА ~1500 л. н. НА КАМЧАТКЕ

© 2024 г. С. Б. Фелицын^а, *, В. Ю. Кирьянов^б, **

^аИнститут геологии и геохронологии докембрия РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^бООО “АЛСИ НОРД”, ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия

*e-mail: felitsynsergey@gmail.com

**e-mail: vladimir.kiryanov@alcinord.com

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 03.11.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

Содержащие серу продукты вулканических извержений плинианского типа могут переноситься на значительное расстояние в газовых порах пепловых частиц. В риолитовой тефре извержения вулкана Опала ~1500 лет назад среднее содержание серы составляет 310 г/т при максимальной концентрации до 800 г/т. Обнаружена связь между содержанием серы в валовых пробах и гранулометрическим составом: сера преимущественно содержится во фракции 0.25–0.50 мм, представленной удлинёнными частицами пепла с вытянутыми газовыми порами диаметром 1.0–10.0 мкм. Наиболее вероятной причиной зависимости содержания серы от текстуры пепловых частиц является сохранность соединений серы водорастворимого комплекса внутри газовых пор; сорбированные на поверхности пепловых частиц серосодержащие соединения были удалены атмосферными осадками в процессе нахождения тефры в континентальных обстановках. Попадание в донные осадки содержащих соединения серы на внутренней поверхности газовых пор пепловых частиц при извержениях плинианского типа, подобных извержению вулкана Опала ~1500 лет назад, может оказать влияние на геохимию литогенеза и привести к перераспределению чувствительных к наличию кислотообразующих агентов в толще осадка на стадии диагенеза.

Ключевые слова: извержение вулкана Опала ~1500 лет назад, вулканический пепел, сера, газовые поры, текстура тефры

DOI: 10.31857/S0203030624030029, EDN: JRASZQ

ВВЕДЕНИЕ

Для крупнейших исторических извержений (Тамбора, 1815 г., Катмаи-Новарупта, 1912 г., Пинатубо, 1991 г.) количество эмитированных сульфатных аэрозолей может достигать сотен миллионов тонн, составляя до 1% извергнутого материала (например, [Self, 2006]). Последствия попадания кислотообразующих агентов вулканического происхождения в атмосферу Земли являются значительными как для климата [Асатуров и др., 1986], так и для геохимии зоны гипергенеза в зоне выпадения кислотных осадков [Израэль и др., 1989]. Взаимодействие магматических летучих и пеплового материала при эксплозивных

извержениях различного типа имеет следствием формирование водорастворимого комплекса на поверхности твердых взвешенных частиц. Главными компонентами подобного комплекса традиционно рассматриваются сульфаты и хлориды, количество которых может составлять $n \times 10^3$ мкг/г пеплового материала [Малик, 2019]. В некоторых случаях содержание серы в водорастворимом комплексе тефры является экстремально высоким – в пепле извержения мексиканского вулкана Эль-Чичон (март–апрель 1982 г.) содержание сульфата кальция достигает 2 вес. % [Luhr et al., 1984]. При сильных эксплозивных извержениях плинианского типа дистальная

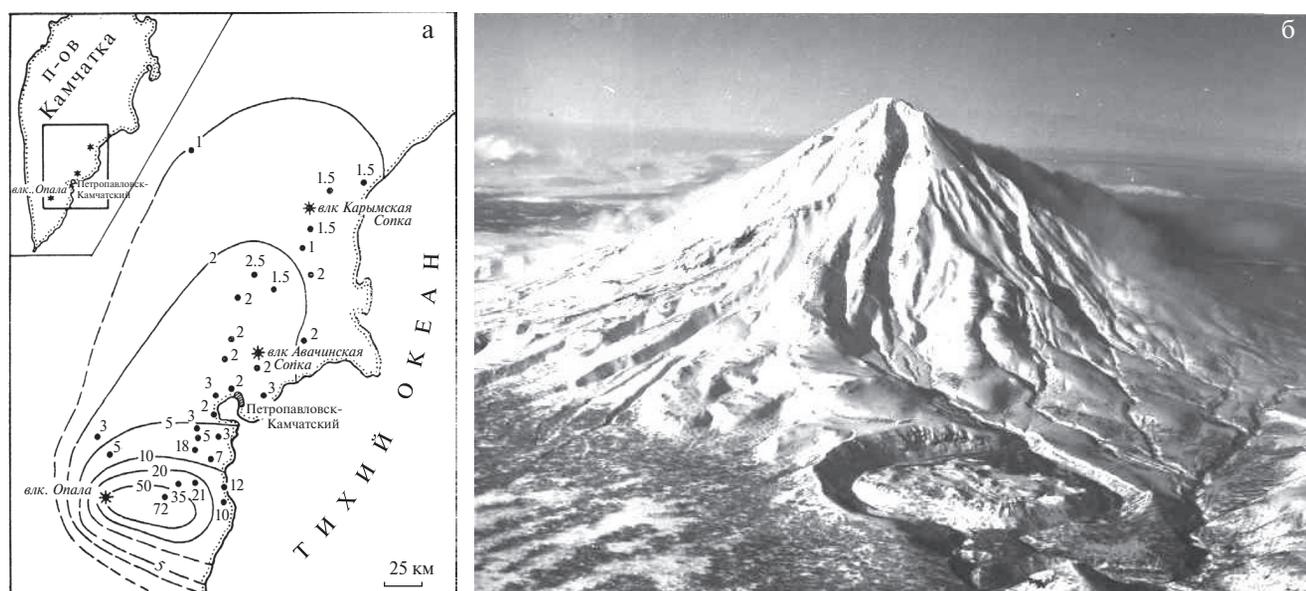


Рис. 1. Карта изопахит (в см) пеплового горизонта ОП-1500 (а) и вид вулкана Опала (б). На переднем плане Бараний Амфитеатр, образованный при извержении ~1500 лет назад.

тефра распространяется на сотни—тысячи километров от вулкана. Для исторических извержений подобные пепловые отложения являются основным источником информации о характере извержения и масштабе выноса магматических продуктов, включая элементы, обогащающие газовую фазу. В процессе транспортировки пеплового материала и его отложения в континентальных обстановках и/или в морских бассейнах следует ожидать удаление большей части водорастворимого комплекса за счет взаимодействия с атмосферными осадками или в колонне воды. По этой причине затруднена оценка масштабов выноса кислотообразующих агентов с вулканическими пеплами древних извержений, а также степень влияния дистальной тефры на геохимию осадконакопления.

В настоящей работе приведены данные по распределению серы в тефре извержения вулкана Опала, целью работы является определение связи между содержанием серы и гранулометрическим составом частиц тефры извержения вулкана Опала ~1500 л. н. (далее ОП-1500) для оценки сохранности соединений водорастворимого комплекса в пепловых частицах исторических извержений.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являются образцы из пеплового горизонта побочного извержения

вулкана Опала ~1500 л. н. на восточном побережье Камчатки. У подножия юго-восточного склона вулкана на краю кальдеры находится крупный кратер (Бараний Амфитеатр) размером 1.3 на 2.0 км, и высотой внутренних стенок до 200 м, извержение которого рассматривается в данной работе (рис. 1). Оно было одним из крупнейших на Камчатке за последние 2000 лет. В разрезе, изученном в 50 км от вулкана Опала, тефра имеет трехчленное строение: верхние 2 см — среднезернистый и крупнозернистый песок, в средней части — 2 см вулканический гравий (до 1 см в диаметре), нижние 2 см — среднезернистый и крупнозернистый песок. Эти три подгоризонта разной крупности отвечают отдельным стадиям извержения в процессе формирования Бараньего Амфитеатра, образование которого имеет общие черты с формированием кратера Новарупта (вулкан Катмаи) на Аляске в 1912 г. Подгоризонты разной крупности пепла были обнаружены и при детальном изучении выбросов при формировании кратера Новарупта, расположенного в 10 км от вулкана Катмаи (Аляска) при катастрофическом извержении 1912 г., которое продолжалось 60 часов, а высота эруптивной колонны достигала 20 км. На о. Кадьяк, расположенном в 260 км от центра извержения, выпало 30 см вулканического пепла и, по воспоминаниям местных жителей: "...Были три различных слоя пепла. Первый слой был груб

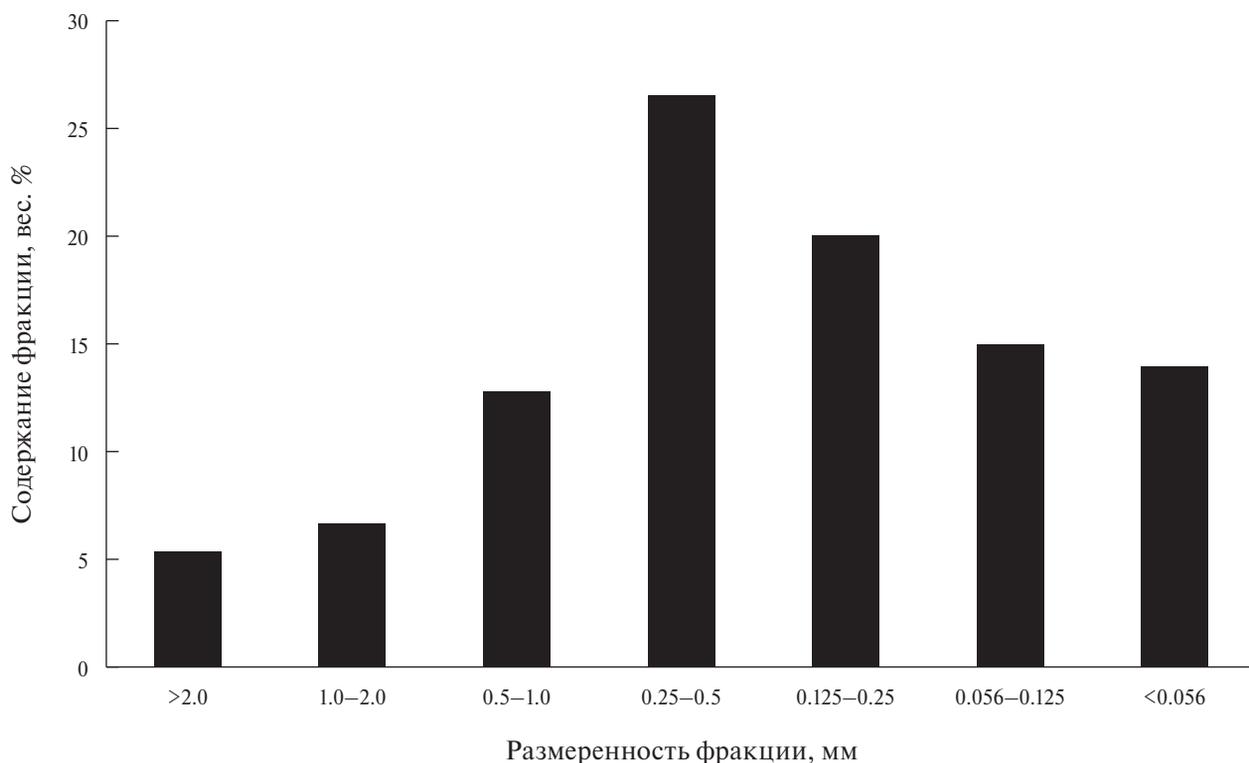


Рис. 2. Гранулометрический состав пеплового горизонта извержения вулкана Опала ~1500 лет назад.

и кофейного цвета, второй слой не был таким темным и грубым, последний слой пепла был как порошок...” [Bruce et al., 2003].

Главная масса крупных фракций тефры, связанная с извержением побочного прорыва на склоне вулкана Опала (Бараньего Амфитеатра), выпала к востоку от вулкана – на побережье и в акватории Тихого океана. Мощность грубой тефры (грубозернистый пемзовый песок с примесью мелкого гравия пемзы) в 75 км к востоку от Бараньего амфитеатра (в районе бухты Фальшивая) достигает 12–15 см. К северо-востоку от вулкана вулканический пепел прослежен до Кроноцкого озера, на расстоянии более 300 км [Кирьянов, Соловьева, 1990]. Объем выброшенной тефры составляет более 10 км³ по данным изучения ареала ее распространения по изопакитам. Ювенильная тефра (более 90%) представлена вулканическим стеклом риолитового состава с подчиненным количеством плагиоклаза и биотита, резургентный материал состоит из обломков пород дацитового состава старой вулканической постройки. Детальные материалы по составу тефры извержения и положение точек пробоотбора ОП-1500

представлены в работах [Фелицын и др., 1990; Мелекесцев и др., 1991].

Гранулометрический состав пепла получен сухим просеиванием навески 50 г в течение 15 мин на вибрационном электромагнитном ротате Analysette 3 PRO, Fritsch (Germany) на семь фракций – >2.0, 1.0–2.0, 0.5–1.0, 0.25–0.5, 0.125–0.25, 0.056–0.125 и <0.056 мм. Перед рассевом проводилась ультразвуковая отмывка пепловых частиц с последующим высушиванием, взвешивание осуществлено на весах ВЛТКА-500.

Содержание серы определено методом объемной иодометрии по методике НСАМ 1-Х в Опытно-методической экспедиции ПГО “Севзапгеология” в г. Санкт-Петербург, нижний предел определения 0.0015 вес. %, средняя относительная погрешность определения – менее 8 отн. % при содержании серы менее 500 г/т и менее 6% при содержании серы более 500 г/т. Для получения изображений и данных по составу использован растровый электронный микроскоп JSM-6510LA (Japan), оснащенный спектрометром JED-2200 (JEOL), измерения проводились в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург.



Рис. 3. Зависимость концентрации серы в валовых пробах пепла ОП-1500 от содержания в них фракции 0.25–0.50 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исключения влияния эоловой гравитационной дифференциации на распределение по размеру пепловых частиц проведена рандомизация результатов по гранулометрическому составу, полученных на различном расстоянии от центра извержения – от 5 до 250 км, всего 45 единичных определений гранулометрии на площади пеплопада ОП-1500. На основе полученной случайной выборки (15 определений) построена гистограмма содержания различных фракций в пепле извержения ~1500 л. н. (рис. 2), показывающая, что в пепловом материале преобладает фракция 0.25–0.50 мм, составляющая более 26% объема тефры.

Содержание серы в изученных образцах пепла ОП-1500 составляет от 80 до 830 г/т при среднем значении 310 г/т ($n = 45$). Обнаружена связь между валовым содержанием серы и количеством частиц размером 0.25–0.50 мм в пробе (рис. 3). Взаимосвязи с содержанием других фракций и элементов (петрогенных и микроэлементов) не обнаружено. При содержании в пробе пепла указанной фракции более 50 вес. %, содержание серы в пробе составляет ~800 г/т, при содержании фракции 0.25–0.50 мм менее 15% содержание серы минимально (около 200 г/т). Дистальная тефра ОП-1500, состоящая преимущественно из частиц крупностью менее 0.125 мм, не показывает обогащение серой.

Исследование с помощью растрового электронного микроскопа частиц пеплового материала позволило установить различие текстур пепловых частиц различных гранулометрических

фракций: во фракциях крупностью менее 0.25 мм преобладают обломки стекла, практически не содержащие газовых пор, видимых при увеличении в 1000 раз. Во фракциях крупнее 0.5 мм значительную долю составляют обломки пород дацитового состава. Особенностью частиц стекла риолитового состава фракции 0.25–0.50 мм является наличие вытянутых пор диаметром первые мкм и менее (рис. 4), определяющих морфологию частиц ювенильной компоненты пеплового материала извержения вулкана Опала ~1500 л. н. На внутренней поверхности газовых пор подобных частиц обнаружены пленки толщиной менее 1.0 мкм, содержащие серу и кальций. Провести количественное определение состава этих пленок с помощью спектрометра JED-2200 (JEOL) оказалось невозможным. На внешней поверхности пепловых частиц подобных пленок не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Унимодальное распределение пепловых частиц по размеру является особенностью взрывных извержений, в том числе плинианского типа [Verhoogen, 1951; Walker, 1971]. Считается, что пепловые частицы имеют приблизительно логнормальное распределение по размерам и отклонения от такого распределения могут быть вызваны смешением двух или более распределений, каждое из которых будет тем не менее логнормальным. При этом мода распределения представлена частицами размером от 0.25 до 1.0 мм ювенильной тефры, что определяется особенностями механизма дезинтеграции вязкой магмы в процессе извержения (напр., [Alidibirov, Dingwell, 1996, 1997]). Аналогичное распределение с максимумом в интервале размерности 0.125–0.50 мм характерно для пеплов ОП-1500. Несмотря на очевидное завышение содержания тонких фракций при рассеивании в результате разрушения пепловых частиц при рассеивании в ротапах, логнормальное распределение пепловых частиц по размеру считается адекватной характеристикой пеплового материала.

Ранее [Мелекесцев и др., 1991] была показана связь между гранулометрией пеплов ОП-1500 и составом фракций. Резургентные обломки дацитового состава представляют основную массу гранулометрических фракций крупностью

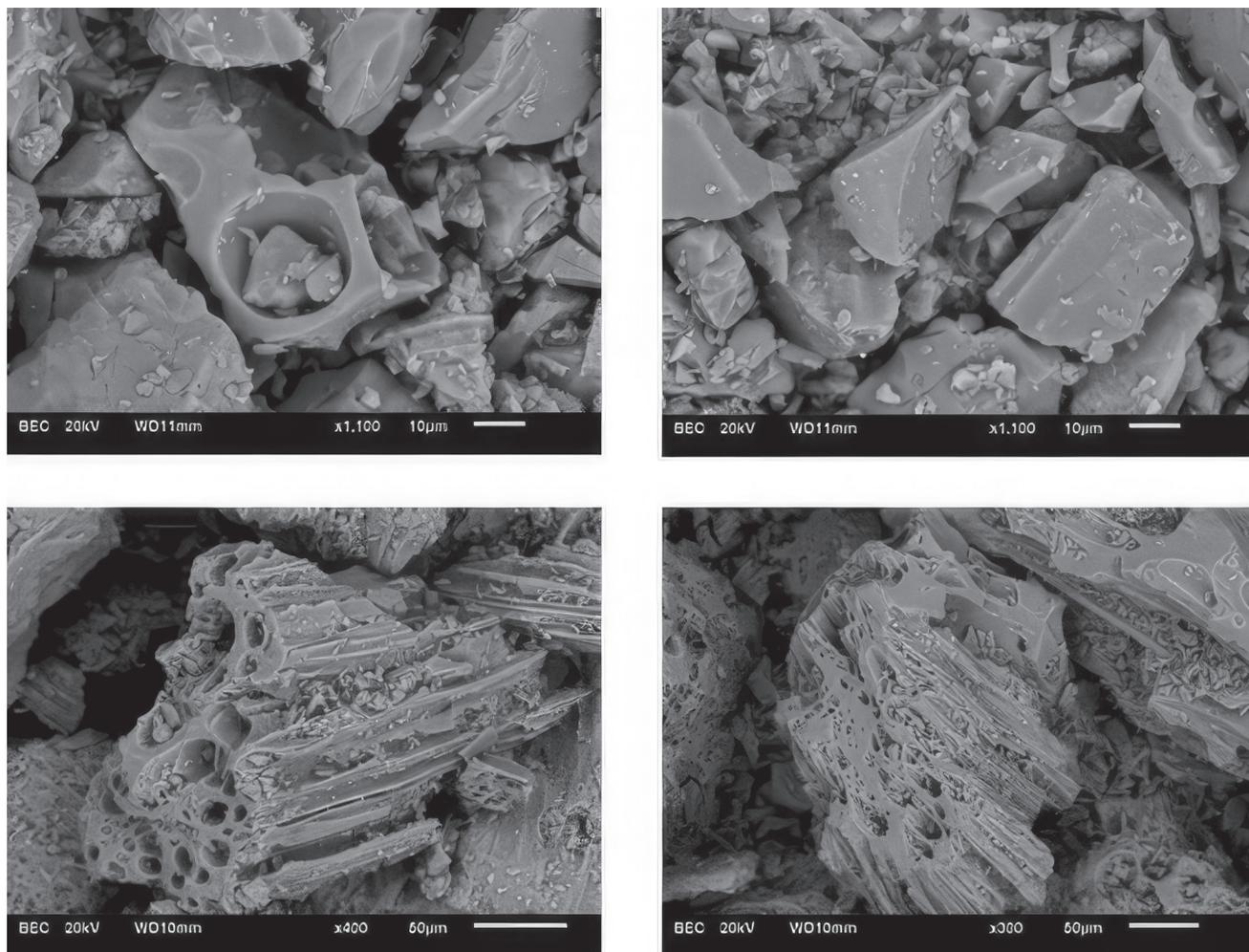


Рис. 4. СЭМ изображение пепловых частиц ОП-1500, место отбора пробы в 9.5 км от Бараньего Амфитеатра. Верхний ряд – фракция менее 0.056 мм, нижний ряд – фракция 0.25–0.50 мм.

более 1 мм, фракции менее 0.25 мм состоят из фрагментов вулканического стекла, в которых газовых пор намного меньше, чем в риолитовом стекле материала более крупных фракций. Частицы пепла фракции 0.25–0.50 мм имеют вытянутую форму, определяемую наличием линейных газовых пор диаметром 1.0–10.0 мкм (см. рис. 3) и морфологически сходную с крупными пемзовыми частицами. Подобная текстура пепловых частиц обнаружена в продуктах известных кальдерообразующих извержений (Тамбора, Катмаи, Кракатау, Бандельер Туф, Крейтер Лейк (Мазам) и ряда других) и объясняются деформацией сферических газовых пор в риолитовой магме при ее движении на незначительной глубине [Heiken, 1972]. Для тефры ОП-1500 характерно преобладание (около 40% объема тефры) пористых частиц размером

0.1–0.5 мм ювенильного материала (см. рис. 1) и именно для частиц подобной крупности характерно наличие вытянутых газовых пор.

Взаимодействие твердой и газовой фазы в газопылевом облаке приводит к обогащению тонких фракций пепловых частиц элементами, содержащимися в вулканических газах. В образцах тефры ОП-1500, отобранных на расстоянии более 200 км от центра и на 95% состоящих из частиц стекла размером менее 56 мкм, содержание сурьмы в три раза выше, чем в тефре на расстоянии 18 км от вулкана, где содержание фракции менее 56 мкм не превышает 2 вес. %. Аналогичная закономерность имеет место и для извержений других вулканов (Хангар 7500 л. н. и Шивелуч 1500 л. н.) – содержание мышьяка и сурьмы в тонких фракциях на порядок выше, чем в крупных [Фелицын и др., 1990].

Низкая растворимость серы в магме риолитового состава исключает возможность концентрации серы в твердой фазе эксплозий плинианского типа, подобных извержению вулкана Опала ~1500 л. н. (например, [Zelenski et al., 2021]). Материалы изучения состава пеплов ОП-1500 с помощью растровой электронной микроскопии показали, что в стекле пепловых частиц (фракция 0.25–0.50 мм) содержание серы ниже предела обнаружения использованного метода. В свете этого, связь содержания серы и количества частиц размером 0.25–0.50 мм в пробе (см. рис. 2) определяется сохранностью водорастворимого комплекса внутри газовых пор пепловых частиц, поскольку на поверхности пепловых частиц и в стекле ОП-1500 соединений серы не обнаружено. Площадь пеплопада расположена в гумидной зоне со среднегодовым уровнем осадков от 1300 до 2600 мм/год, то есть за 1500 лет количество атмосферных осадков, прошедших через 1 м² поверхности составляет сотни тонн. Очевидно, что большая часть водорастворимого комплекса (включая соединения серы) была вынесена из пеплов с метеорными водами. Возможность сохранности соединений водорастворимого комплекса внутри газовых пор частиц фракции 0.25–0.50 мм объясняется трудностью проникновения водных растворов в вытянутые поры диаметром менее 10 мкм. Согласно формуле Лапласа, избыточное давление на мениск жидкости при прочих равных условиях прямо пропорционально поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорционально радиусу капилляра. При значении коэффициента поверхностного натяжения воды $\sim 70 \times 10^{-3}$ н/м в интервале температур от 5 до 40 °С, избыточное давление препятствует затеканию воды атмосферных осадков в вытянутые газовые поры диаметром первые микроны, особенно закрытых с одной стороны (в отличие от шлаков, имеющих сквозные поры, полностью заполняемые водой). Именно такие закрытые газовые поры наблюдаются в рассматриваемых пемзовых частицах ОП-1500. Наличие продуктов водорастворимого комплекса (включая соединения серы) на внутренней поверхности газовых пор тефры ОП-1500 также означает их сохранность в процессе промывки водой при разделении валовых проб на фракции.

Полученные данные по распределению серы в пеплах ОП-1500 позволяют сделать

следующий вывод: фракция 0.25–0.50 мм, представленная ювенильными материалами и составляющая значительную часть объема тефры рассматриваемого извержения, является главным концентратором серы в твердых частицах и может переноситься на сотни километров от центра извержения.

Поскольку фракция 0.50–0.25 мм состоит преимущественно из пепловых частиц с линейными газовыми порами, способствующими сохранности водорастворимого комплекса на их внутренней поверхности, наблюдаемая корреляция между содержанием фракции 0.50–0.25 мм и концентрации серы (см. рис. 2) отражает сохранность компонентов водорастворимого комплекса пепла и не может являться оценкой масштабов выноса серы с пеплами при извержении вулкана Опала ~1500 л. н.

На основании полученных данных по связи текстуры пепловых частиц и крупности пепла ОП-1500, а также материалов по гранулометрическому составу дистальной тефры других крупных извержений плинианского типа, подобных извержению вулкана Опала ~1500 лет назад, правомерно предположить возможное влияние вынесенной на пепловых частицах серы на геохимию диагенеза в толще осадков. Выпадение крупных фракции и пепла на расстоянии в сотни километров от центра извержения означает вероятность поступления сохранившихся внутри частиц пепла кислотообразующих агентов вулканического происхождения на значительном удалении от вулкана.

При сильном эксплозивном извержении вулкана Ксудач в 1907 г. вулканический пепел выпал не только по всей Камчатке, вплоть до пос. Тигиль, но и был перенесен на противоположный берег Охотского моря в населенные пункты Ямск и Охотск. Основной сектор пеплопада был направлен к северу от вулкана. Толщина пеплового слоя в г. Петропавловске-Камчатском в 155 км от вулкана составляет 3 см и пепел представлен средне- и крупнозернистым песком (0.25–1.0 мм).

Тефра кальдерообразующего извержения вулкана Ксудач в голоцене 1700–1800 ¹⁴С лет назад, сопоставимого по объему выброшенного материала (около 15 км³ тефры) и высотой эруптивной колонны (более 20 км), с извержением вулкана Кракатау в 1883 г., была

непрерывно прослежена вдоль оси пеплопада на север от центра извержения на расстояние более 600 км от вулкана до вулкана Шивелуч на севере Камчатки. В 85 км от вулкана Ксудач на долю фракций 0.5–2 мм приходилось около 50 вес. % и почти 30 вес. % частиц были крупнее 2 мм. Даже в районе вулкана Кизимен, в 410 км от центра извержения, доля крупных фракций пепла (1.0–0.25 мм) составляла около 15 вес. % [Брайцева и др., 1995].

Поступление в зону седиментации пепловых частиц, содержащих остаточную часть водорастворимого комплекса внутри газовых пор, имеет следствием высвобождение продуктов комплекса на стадии аутигенного минералообразования.

Возможно, некоторые геохимические особенности отложений верхнего эдиакария (венда) на юго-западе Восточно-Европейской платформы могут быть объяснены присутствием кислотообразующих агентов, поступивших в толщу осадка вместе с пепловым материалом. Эксплозивный вулканизм на юго-западном обрамлении Восточно-Европейской платформы имеет U-Pb возраст по цирконам из бентонитовых глин 556.78 ± 0.18 млн лет [Soldatenko et al., 2019], но вулканический пепел присутствует и в вышележащих отложениях: наличие пеплового материала в т. н. калюсских слоях (верхний эдиакарий, могилев-подольская серия, нагорьянская свита) в Приднестровье подтверждено литолого-минералогическими [Копелиович, 1965] и геохимическими [Фелицын, Сочава, 1996] данными.

Согласно палеотектоническим реконструкциям, источники пеплового материала в отложениях верхнего эдиакария на юго-западе Восточно-Европейской платформы располагались в районе шовной тектонической зоны, отделяющей Складчатые Карпаты от платформенных комплексов, то есть на расстоянии 150–200 км от разрезов с пепловыми горизонтами. Сопоставление объема тефры и расстояний, на которые может пепловый материал современных крупных извержений плинианского типа, показывает возможность наличия в дистальной тефре частиц размером 0.25–1.0 мм. Отличительной чертой аргиллитов калюсских слоев (мощность ~20 м) является значительная изменчивость содержания

щелочных и щелочноземельных элементов. Содержание Sr в не затронутых вторичной карбонатизацией калюсских аргиллитах изменяется от 20 до 320 г/т при среднем содержании 80 г/т (данные энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа, ЭРФА, 35 определений, настоящая работа), содержание CaO – от 0.07 до 0.7 вес. % при среднем значении 0.18 вес. %, среднее содержание Na составляет 0.68 вес. % (инструментальный нейтронно-активационный анализ, ИНАА, 15 определений, настоящая работа). В ниже- и вышележащих терригенных кластических отложениях верхнего эдиакария на юго-западе Восточно-Европейской платформы столь низкого содержания натрия и подобных вариаций содержания кальция и стронция не наблюдается. Содержание Na в выше- и ниже- лежащих аргиллитах составляет ~1.0 вес. %, Ca = 0.56 вес. %, содержание стронция – 150 г/т [Фелицын, 2006]. Не исключено, что эмиссия соединений серы при разрушении частиц пепла в толще осадка и образовании аутигенных глинистых минералов (для пепловых горизонтов калюсских слоев – главным образом, галлуазит и каолин) и последующее восстановление сульфатной серы увеличила кислотность зоны диагенеза и определила мобильность натрия, кальция и стронция. Наличие дополнительного количества кислотообразующих агентов вулканического происхождения в калюсских слоях привело к мобилизации золота: среднее содержание Au калюсских слоев составляет 4 нг/г, тогда как в выше- и ниже- лежащих пачках содержание золота – 8 нг/г (ИНАА, 64 определений, настоящая работа). Поскольку одной из форм миграции золота в зоне гипергенеза является $[\text{Au}(\text{SO}_4)_2]^-$, наличие дополнительного количества серы, поступившего в толщу осадка с вулканическими пеплами, могло способствовать перераспределению золота в калюсских слоях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженная связь между содержанием серы и текстурой пепловых частиц вулкана Опала, извержение ~1500 л. н., объясняется сохранностью соединений водорастворимого комплекса пеплов внутри газовых пор при воздействии атмосферных осадков на пепловый материал в условиях континентальных

обстановок. В объеме тефры ОП-1500 преобладает частицы крупностью 0.25–0.50 мм, представленные ювенильным материалом пемзового облика с удлинёнными газовыми порами диаметром до 10 мкм, внутри которых сохранились содержащие серу соединения водорастворимого комплекса. Текстура пепловых частиц определяет содержание в них серы, что означает возможность переноса элементов водорастворимого комплекса с дистальной тефрой на значительные расстояния при извержениях, подобных извержению вулкана Опала ~1500 л. н.

Наличие вещества водорастворимого комплекса (в том числе, соединений серы) в газовых порах частиц пепла при извержении типа вулкана Опала ~1500 л. н., означает возможность поступления серы в осадочные отложения вместе с тефрой даже в случае нахождения пеплового материала в субаэральных условиях в течение длительного времени (сотни–тысячи лет). Разрушение частиц пепла на стадии раннего и позднего диагенеза может увеличить кислотность условий аутигенного минералообразования и привести к перераспределению лабильных соединений в толще осадка. Данные по геохимии содержащих вулканические пеплы аргиллитов верхнего эдиакария на юго-западе Восточно-Европейской платформы подтверждают подобную возможность.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГГД РАН № FMUW-2022-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я. и др.* Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Кирьянов В.Ю.* Последнее кальдерообразующее извержение на Камчатке (вулкан Ксудач) 1700–1800 ¹⁴С лет назад // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30–49.
- Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я. и др.* Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 269 с.
- Кирьянов В.Ю., Соловьева Н.А.* Изменение вещественного состава вулканических пеплов в результате гравитационной эоловой дифференциации // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 10–19.
- Копелиович А.В.* Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы // Труды ГИН АН СССР. 1965. Вып. 121. 349 с.
- Малик Н.А.* Пеплы извержений вулканов Камчатки (2006–2013 гг.): состав, масса и водорастворимый комплекс / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2019. 28 с.
- Мелекесцев И.В., Фелицын С.Б., Кирьянов В.Ю.* Извержение вулкана Опала около 500 г. – крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 21–34.
- Фелицын С.Б.* Щелочноземельные элементы в венд-кембрийских глинистых породах Восточно-Европейской платформы // Литология и полез. ископаемые. 2006. № 4. С. 405–414.
- Фелицын С.Б., Ваганов П.А., Кирьянов В.Ю.* Распределение редких и рассеянных элементов в пеплах вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 23–35.
- Фелицын С.Б., Сочава А.В.* Eu/Eu* в аргиллитах верхнего венда Русской платформы // ДАН. 1996. Т. 351. С. 521–524.
- Alidibirov M., Dingwell D.B.* Magma fragmentation by rapid decompression // Nature. 1996. V. 380. P. 146–148.
- Alidibirov M., Dingwell D.B.* Factors governing fragmentation of highly viscous magma // Terra Nova. 1997. V. 8. P. 189.
- Bruce F., Wilson C.J.N., Fierstein J., Hildreth W.* Complex proximal deposition during the Plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Alaska / Published online: September 13, 2003. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- Heiken G.* Morphology and petrography of volcanic ashes // Geol. Soc. Amer. Bull. 1972. V. 82. P. 1961–1988.
- Luhr J.F., Carmichael I.S.E., Varekamp J.C.* The 1982 eruption of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: Mineralogy and petrology of the anhydrite bearing pumices // J. of Volcanology and Geothermal Research. 1984. V. 23. P. 69–108.
- Self S.* The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions // Philos. Trans. R. Soc. A. 2006. V. 364. P. 2073–2097.
- Soldatenko Y., El Albani A., Ruzina M., Fontaine C., Nesterovsky V., Paquette J.-L., Meunier A., Ovtcharova M.* Precise U-Pb age constrains on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine // Scientific Reports. 2019. V. 9. Art. № 1675.

- Verhoogen J.* Mechanism of ash formation // Amer. J. Sci. 1951. V. 249. P. 729–739.
- Walker G.P.L.* Grain size characteristic of pyroclastic deposits // J. of Geol. 1971. V. 79. P. 696–714.
- Zelenski M., Simakin A., Taran Yu., Kamenetsky V.S., Malik N.A.* Partitioning of elements between high-temperature, low-density aqueous fluid and silicate melt as derived from volcanic gas geochemistry // Geochim. Cosmochim. Acta. 2021. V. 295. P. 112–134.

Sulfur in Tephra of Opala Volcano Eruption ca. 1500 years ago, Kamchatka

S. B. Felitsyn^{1, *}, V. Yu. Kiryanov^{2, **}

¹*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS,
Makarova emb., 2, Saint-Petersburg, 199034 Russia*

²*AICI NORD Ltd., Bering str., 38, Saint-Petersburg, 199397 Russia*

**e-mail: felitsynsergey@gmail.com*

***e-mail: vladimir.kiryanov@alcinord.com*

Sulfur-bearing compounds of Plinian-type volcanic eruptions can be transferred with ash particles of distal tephra over considerable distances. Average sulfur content in tephra of Opala volcano (Kamchatka, eruption ca. 1500 years ago) comprises 310 ppm with maximum concentration up to 800 ppm. Connection detected between sulfur content in bulk samples and the particle size distribution – sulfur is predominantly contained in the fraction 0.25–0.50 mm represented by elongated ash particles with elongated gas pores 1.0–10.0 μm in diameter. The most likely reason for the dependence of sulfur content on the texture of ash particles is preservation of sulfur compounds of the water-soluble complex inside gas pores. Sulfur-containing compounds deposited on the surface of ash particles were removed by precipitation in the process of existing tephra in continental environment. Ingress of ash particles into bottom sediments containing sulfur compounds on the inner surface of gas pores during plinian type eruptions similar to the eruption of Opala volcano ca. 1500 years ago, may influence the geochemistry of lithogenesis and lead to redistribution of elements sensitive to the presence of acid-forming agents in the sediment at the stage of diagenesis.

Keywords: Opala volcano eruption ca. 1500 years ago, sulfur, tephra, gas pores, ash particles texture