

**Динамика вымывания биогенных элементов и некоторых вулканогенных макрокомпонентов из пепла вулкана Шивелуч (извержение 11 апреля 2023 года)**

*Походина М.А., Лепская Е.В.*

**Dynamics of leaching of biogenic elements and some volcanogenic macrocomponents from the ash of Shiveluch volcano (eruption of April 11, 2023)**

*Pokhodina M.A., Lepskaya E.V.*

*Камчатский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («КамчатНИРО»), г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: pohodina.ma@gmail.com*

Проведено исследование динамики вымывания биогенных элементов, а также сульфатов и хлоридов из пепла вулкана Шивелуч. Было поставлено два эксперимента, имитирующих процессы вымывания из пепла химических элементов в речной системе. В первом случае была смоделирована ситуация попадания пепла в турбулентное течение, во втором – постепенное смывание его с поверхности атмосферными осадками. Также был определен состав тяжелых металлов в пепле и рН водных вытяжек.

**Введение**

Вулкан Шивелуч – один из крупнейших и наиболее активных вулканов Камчатки [9]. 11 апреля 2023 г. произошло его извержение, а пеплопад стал сильнейшим за десятки лет в расположенном вблизи поселке Ключи. Пепел от данного извержения выпал на снежный покров, поэтому процесс вымывания химических элементов из пепла происходил постепенно, их влияние было пролонгированным и не столь критическим, как если бы извержение происходило в летние месяцы, и пепел попадал непосредственно в водотоки, водоемы и почву. Последнее наблюдали при извержении вулкана Сент-Хеленс (США) в 1980 г. Негативное влияние пепла от этого извержения проявилось в разрушении нерестилищ, повышении температуры воды, уменьшении кормовой базы рыб и прямом воздействии на здоровье рыб. Вулканический пепел, содержащий частицы силикатного стекла, имел острую угловатую поверхность, которая оказывала абразивное воздействие на эпителиальную ткань рыб, особенно на жабры, и вызывала стресс с летальным исходом. Поэтому в реках и ручьях, попавших в зону пеплопада, значительно сократилась численность и биомасса тихоокеанских лососей и форели [12].

Действующие вулканы Камчатки являются постоянным источником поступления веществ в окружающую среду [6]. Поэтому так важно понять, как происходит процесс вымывания из пепла химических веществ в разных условиях. Известно, что обильный пеплопад, содержащий большое количество растворимых солей, попадающих в воду и смываемых с водосбора, изменяет химический состав воды рек. При этом реакция воды становится более кислой. По ионному составу воды камчатских рек при смывании пепла приобретают слабо выраженный сульфатный характер [1, 10]. Вулканические извержения сопровождаются вспышкой урожайности растительности в течение одного вегетационного периода, так как пепел содержит большое количество подвижных фосфатов. Затем питательные вещества быстро вымываются или переходят в неусвояемые формы [7, 11]. Это подтверждают и ранее проведенные исследования динамики вымывания биогенных элементов из пепла и лапиллей в период таяния снега при Трещинном Толбачинском извержении 2013-2014 гг. [5]. Тогда при анализе разноразмерных частиц было установлено, что происходит первоначальное залповое вымывание биогенных элементов с последующей стабилизацией процесса на фоновом уровне, свойственном для камчатских водоемов. Это вымывание носит нелинейный характер и оказывает наибольшее влияние на экосистемы в первый год после извержения.

**Материалы и методы**

Пепел вулкана Шивелуч, отобранный недалеко от поселка Ключи после масштабного извержения 11 апреля 2023 г., массой более 1 кг во влажном состоянии доставили в лабораторию 13 апреля и хранили в холодильнике при +6 °С.

В эксперименте, который имитировал вымывание биогенных элементов (БЭ) в речной системе при активном воздействии на него воды, взяли навеску пепла массой 58 г, которую залили дистиллированной водой объемом 500 мл, перемешивали на магнитной мешалке в течение 1 ч и отстаивали сутки в прохладном помещении при 16 °С, затем отфильтровали через фильтр «синяя лента» с размером пор 2-3 мкм. В полученном фильтрате определили общий азот ( $N_{\text{общ}}$ ), общий фосфор ( $P_{\text{общ}}$ ), минеральные формы азота (азот аммонийный –  $NH_4^+$ , нитритный –  $NO_2^-$  и нитратный –  $NO_3^-$ ), фосфор фосфатов ( $PO_4^{3-}$ ), железо (Fe), кремний (Si), стандартными методами [2]. Навеску пепла последовательно промывали дистиллированной водой, получив четыре вытяжки (14.04, 19.04, 25.04, соответствует номерам 1, 2, 3 на рис. 1). В первом экстракте также определили содержание тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) методом инверсионной вольтамперометрии [8]. С 18 по 25 мая отобрали новую навеску 57 г, в этот раз измеряли только рН фильтрата и сульфаты ( $SO_4^{2-}$ ) [2].

Вторая часть опыта имитировала вымывание пепла атмосферными осадками. Через навеску пепла массой 30 г, находящейся на фильтре, пропускали дистиллированную воду, измеряя полученный объем фильтрата. Фильтрацию провели трижды (09.08, 10.08, 14.08). Каждый раз измеряли содержание БЭ, рН, сульфаты ( $SO_4^{2-}$ ) и хлориды (Cl<sup>-</sup>). Соотношение пепла и воды в первой части опыта составляло 1 к 9 и 1 к 15 во второй части, что относится к рекомендованным соотношениям [6].

## Результаты

**Эксперимент № 1.** На первом этапе эксперимента (экстракт 1) произошло максимально полное вымывание фосфора (рис. 1а) и азота (рис. 1б) – 62 % и 75 % соответственно, представленных, в основном, минеральными формами. На долю аммония пришлось 98 % минерального азота. Аналогично произошло и вымывание железа – 85 %. Кремний вымывался постепенно 25 % и 22 % на первом и втором этапах эксперимента соответственно (рис. 1г).

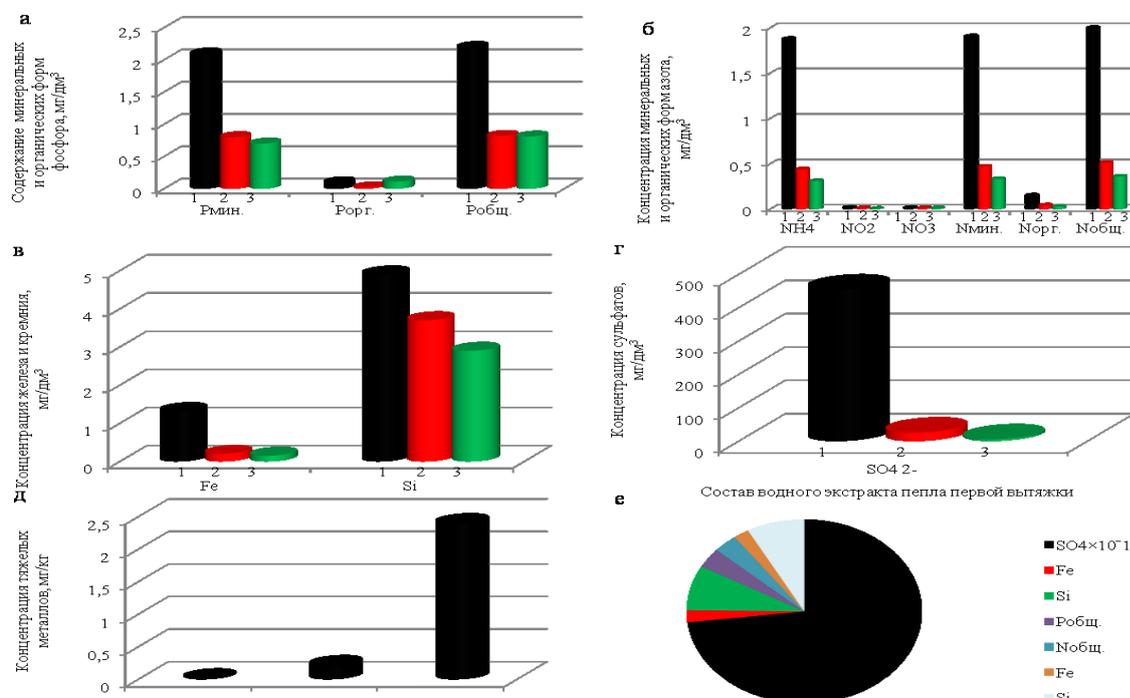


Рис. 1. Содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в водных экстрактах пепла вулкана Шивелуч при активном перемешивании вытяжки пепла (1, 2, 3 – номер экстракта, соответствует датам): а – содержание минеральных и органических форм фосфора; б – содержание минеральных и органических форм азота; в – содержание железа и кремния; г – содержание сульфатов; д – содержание тяжелых металлов; е – общее содержание БЭ и  $SO_4^{2-}$  в первой вытяжке.

Начиная со второго этапа, вымывание всех биогенных элементов, стабилизируется и происходит более равномерно. Сульфаты (рис. 1г) почти полностью вымывались на первом этапе в количестве 95 %, на втором – оставшиеся 5 %, на третьем их содержание было ниже предела обнаружения методикой. Известно, что из всех типов магм для андезита (к которым относятся продукты вулкана Шивелуч) наблюдается наибольшее относительное содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  (до 100 %) [3]. Невозможно не заметить, что большую часть вытяжки составляют  $\text{SO}_4^{2-}$  – 96 %, что отмечают и другие авторы [5] и связывают это с присутствием в пеплах вторичных минералов (гипс), вынесенных при извержении (рис. 1е). Анализ пепла на содержание тяжелых металлов (рис. 1д) проводили по 4 элементам, причем цинк обнаружен не был, меньше всего содержалось кадмия 0.015 мг/кг, на порядок больше свинца и больше всего меди – 2.4 мг/кг. Известно, что на активном вулкане Шивелуч под воздействием паров и кислых конденсатов преобладает вынос из андезитов халькофильных элементов и возрастает содержание Cu [7]. Значение рН в начальной водной вытяжке составило 4.39.

**Эксперимент № 2.** Вымывание БЭ в условиях, имитирующих атмосферные осадки, происходило постепенно. Содержание фосфора на втором и третьем этапах эксперимента составило 45 % и 77 %, и было представлено, как и в первом эксперименте, в основном, аммонием (рис. 2а, б). Подобным образом происходило и вымывание железа – 75 % на первом этапе, только кремний вымывался постепенно: 58 % и 69 % на первом и втором этапах, соответственно (рис. 2в). Вымывание  $\text{SO}_4^{2-}$  происходило точно так же, как и в первом эксперименте, когда пепел активно перемешивали в водной среде. Вымывание  $\text{Cl}^-$  произошло на 90 % на первом этапе, на втором вымылось еще 2 %. Суммарное содержание этих ионов составило 99.1 %, соотношение  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  – 4:1 (рис. 2г). Ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  являются вулканогенными макрокомпонентами, и их повышенные концентрации в химическом составе поверхностных вод после извержений нормальны, однако исследователи отмечают их быстрое вымывание [6]. На начальном этапе второго эксперимента было зафиксировано самое низкое значение рН – 4.78. По мере вымывания из экстрактов сульфатов и хлоридов, рН увеличилось до субнейтральных значений (5.97 на втором и 6.12 на третьем этапах).

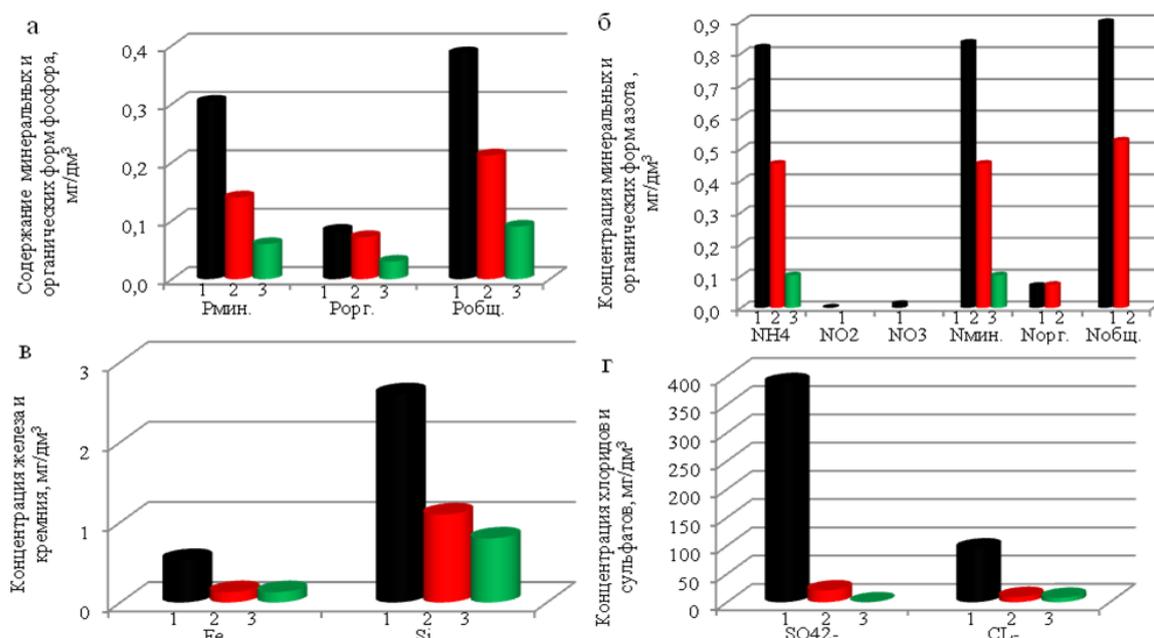


Рис. 2. Содержание БЭ в водных экстрактах пепла вулкана Шивелуч при имитации вымывания его атмосферными осадками: а – содержание минеральных и органических форм фосфора; б – содержание минеральных и органических форм азота; в – содержание Fe и Si; г – содержание  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ .

### Заключение

Таким образом, экспериментально установлено, что вымывание биогенных элементов и некоторых вулканогенных макрокомпонентов из пепла вулкана Шивелуч происходит довольно быстро. Причем, чем активнее перемешивается пепел с водой, тем более залповым происходит выход химических элементов. После третьего этапа вымывания в обоих экспериментах вытяжка из пепла превращалась в опалесцирующую взвесь, которая проходила через фильтр и не осаждалась центрифугированием при 8500 об./мин на протяжении 15 мин. Отметим, что существует определенная закономерность воздействия вулканического пепла на водоемы. Свежие, ювенильные пеплы вызывают ингибирование биологических процессов в водоемах, а при вымывании из них ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$  можно наблюдать природный фертилизационный эффект [4].

### Список литературы

1. Агафонова К.Г. Гидрохимический режим рек Камчатки // Вопросы географии Камчатки Вып. 2. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное издательство, 1964. С. 49.
2. Алевин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
3. Ершов В.В. Химический состав водных вытяжек из пеплов вулканов Курильских островов // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2020. С. 343-346.
4. Лепская Е.В. Влияние пепла вулкана Алаид на фитопланктон озера Курильского (Южная Камчатка) // Исследование биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. Петропавловск-Камчатский: Камчатское отделение тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Вып. II. 1993. С. 21-24.
5. Лепская Е.В., Маслов А.В., Тепнин О.Б., Свириденко В.Д. Биогенные элементы (содержание, динамика вымывания) из разноразмерного пирокластического материала Плоского Толбачика (извержение 2012-2013 гг.) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 227-235.
6. Малик Н.А. Пеплы извержений вулканов Камчатки (2003-2013 гг.): состав, масса и водорастворимый комплекс. Дис. на соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2019. 160 с.
7. Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
8. МУ 31-11/05 Количественный химический анализ проб почв, тепличных грунтов, сапропелей, илов, донных отложений, твердых отходов. Методика выполнения измерений массовых концентрация цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА / ООО «НПП» Томьаналит». Томск, 2006. 49 с.
9. Певзнер М.М., Бабанский А.Д. Возраст вулкана Молодой Шивелуч и эволюция состава его пород // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. XI Всероссийское петрографическое совещание, 24-28 августа 2010 г. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010. С. 115-116.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 368 с.
11. Dahm C.N., Baross J.A., Lilley M.D. et al. Lakers in the blast zone of Mt. St. Helens: chemical and microbial responses following the may 18, 1980 eruption // Selected Papers from Mt. St. Helens Effects on Water Resources proceedings from the conference. 1982. P. 98-137.
12. Phinney D.E. General overview of immediate and longer-term effects of Mount St. Helens on the salmon resources // Selected Papers from Mt. St. Helens Effects on Water Resources proceedings from the conference, 1982. P. 293-299.