

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.423.1

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЛАТО ТОЛБАЧИНСКИЙ ДОЛ¹

© 2022 г. Н. А. Билая^{a, b}, А. П. Кораблев^b, П. С. Зеленковский^a, С. Н. Чуков^{a, *}

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская набережная, 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^bБотанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376 Россия
*e-mail: s_chukov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 07.12.2021 г.

Проведено исследование геохимических особенностей вулканических почв Vitric Andosols, центральной части вулканического плато Толбачинский дол близ лавовых потоков Клешня и Алаид для определения связи элементного состава материнских пород с формирующимися на них почвами и растительностью. Элементный состав проб определяли методами рентгенофлуоресцентного анализа и ICP-AES. При статистической обработке данных использовали корреляционный анализ, метод главных компонент, алгоритм неметрического многомерного шкалирования (Statistica 7, программная среда R). Распространение элементов в почвах в большей степени определяется рельефом. Концентрации Fe, Ca, Ti по всей изучаемой территории превышают региональный фон для восточного района северной почвенной провинции Камчатки. Различия между растительными сообществами, произрастающими на разных лавовых потоках, больше связаны с макрорельефом и размером обломков лавы, чем с элементным составом почв и подстилающей лавы, однако прослеживается сильная связь распределения Cu, P с проективным покрытием и количеством видов сосудистых растений.

Ключевые слова: базальтовая тефра, большое трещинное Толбачинское извержение, Vitric Andosols, показатель Zc, пирокластический материал

DOI: 10.31857/S0032180X22040049

ВВЕДЕНИЕ

Геохимические условия формирования почв на Камчатке очень контрастны, поскольку продукты извержений разных вулканов могут существенно отличаться по химическому и минералогическому составу. Это позволяет изучать разнообразие процессов формирования почв на вулканических продуктах разного химического состава. Исследование специфики почв, формирующихся в условиях активного вулканизма занимались многие отечественные ученые: Ливеровский, Ильина, Зонн, Соколов, Маречек, Белоусова, Тонконогов, Карпачевский, Геннадиев, Захарихина и др. [1, 5, 8, 10, 11, 17–19, 23]. За рубежом формирование почв в условиях вулканизма также изучали и раньше [37], данное исследование было основано на сравнении вулканических почв, расположенных на разных континентах, в разных климатических условиях. Многие зарубежные исследователи

[33, 35, 36] описывают вулканические почвы, расположенные в условиях теплого климата. Однако исследования исландских ученых [29, 30, 34] посвящены изучению почв, формирующихся в условиях подобных камчатским (холодный гумидный климат).

На небольшой территории исследования (около 12 км²) наблюдается разнообразие подстилающих продуктов прежних извержений (лавы), рельефа и других факторов почвообразования (неравномерность развития растительного покрова и др.). В связи с этим исследование закономерностей влияния эколого-геохимических особенностей материнских пород Толбачинского дола на формирование почв и растительности является актуальной задачей. Ранее подобные взаимосвязи на плато Толбачинский дол не изучались, а характеристика элементного состава верхних горизонтов почв (тефры) дана лишь для южного участка плато [3].

Цель работы – изучение геохимических особенностей формирующихся почв вулканического плато Толбачинский дол близ лавовых потоков

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22040049.

Клешня и Алаид, анализ взаимосвязи химического состава верхних горизонтов почв (тефры) с характером растительных сообществ.

Задачи исследования: определить элементный состав проб верхнего горизонта почвы на всей изучаемой территории, включая участки выходов на поверхность разных по составу лавовых потоков Клешня и Алаид, выявить закономерности распределения валового содержания определенных элементов; проанализировать различие геохимических особенностей почв и растительных сообществ на двух разных лавовых потоках (Клешня и Алаид) и выявить факторы, определяющие данное различие; охарактеризовать взаимосвязь элементного состава верхнего горизонта почвы на участках лавовых потоков и погребенной лавы с характером растительных сообществ.

ФАКТОРЫ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

Территория исследования расположена в центральной части Толбачинского дола, которую занимают обширные пеплово-шлаковые поля и лавовые потоки разных возрастов, на которых медленно идет процесс образования первичной растительной сукцессии и первичного почвообразования.

Геология. Основной почвообразующей породой на территории исследования является рыхлый пирокластический осадок – тефра [6], с Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ), однако местами на дневную поверхность выходят продукты более древних извержений других конусов: лавовые потоки Клешня и Алаид.

На склонах системы Толбачинских вулканов в течение последних 10 тыс. лет активно работает трещинная зона моногенных шлаковых и шлаколавовых конусов, извергающих лавы различного химического состава [2].

Конусы состоят в основном из шлака, но часто формируют лавовые потоки длиной до 10 км. В течение 2–10 тыс. лет назад в зоне извергались только субщелочные высокоглиноземистые базальты [26]. Около 2 тыс. лет назад начался “контрастный” период извержений, в течение которого извергались как высокоглиноземистые, так и высокомагнезиальные базальты [2]. В этот период были извержены исследованные лавовые потоки Клешня и Алаид.

В работе Чуриковой с соавт. [27] все базальты моногенных конусов Толбачинского массива разделены по величине отношения MgO/Al_2O_3 на четыре типа. Исследуемые лавовые потоки относятся к разным типам: Алаид – I тип (магнезиальные, умеренной щелочности, со средним содержанием К), Клешня – III тип (субщелочные глиноземистые, высоким содержанием К трахибазальты) [27, 28].

В прошлом почвы на Толбачинском доле были погребены в ходе БТТИ [27]. Мощный пеплопад погубил растительность дола на площади около 400 км², а местность превратилась в безжизненную шлаково-пепловую пустыню [24]. Пирокластический материал БТТИ отличается большим разнообразием формы и размеров обломков при общем уменьшении размеров частиц пепла от 2 до 0.5 мм по мере удаления от центра извержения [25, 31]. Шлак и другие продукты данного извержения являются (суб)афировыми базальтами с единичными кристаллами оливина, плагиоклаза, клинопироксена [25]. Пеплы представлены преимущественно вулканическим стеклом, шлаковидными обломками базальтов, измененными обломками базальтов красно-бурого цвета и единичными обломками кристаллов плагиоклаза и темноцветных минералов. Состав пеплов в пределах 20 км от центра извержения, куда входит территория исследования, не дифференцирован [25].

Растительность Толбачинского дола весьма гетерогенна, что связано с вулканическими образованиями, образующими поверхность дола: лавовые потоки разного возраста (от раннеголоценовых до современных), поля аккумуляции тефры, шлаковые конусы [7], местами погребенные органогенные горизонты.

На всей исследуемой территории растительность представляет собой травяные и мохово-лишайниковые группировки. Проективное покрытие сосудистых растений на пробных площадях лавовых потоков Клешня и Алаид варьирует от 0 до 4%. Проективное покрытие мхов и лишайников – от 0.5 до 20%. Большинство (10) сообществ находятся на первой стадии сукцессии (первичная колонизация – разреженные моховолишайниковые и травяные группировки), 6 – на второй стадии сукцессии (моховолишайниковые и травяные группировки сомкнутостью >5%, моховые и злаковые (*Leymus interior*) сообщества, закрепление субстрата) по [14].

На сегодняшний день растительные сообщества Толбачинского дола отличаются от сообществ фоновых местообитаний значительной степенью вулканогенной трансформации, которая выражается в изменении структуры сообществ, существенных отличиях во флористическом составе, количественных соотношениях видов-доминантов, содоминантов и подчиненных видов и в нарушении соотношения различных экологических групп видов по сравнению с сообществами, не подверженными сильному влиянию вулканизма. В сообществах присутствуют виды, обычные для начальных стадий зарастания вулканических отложений [13].

Почвы. Территория исследования относится к восточному району Северной почвенной провин-

ции Камчатки [18]. Поскольку на Толбачинском доле почвы подвержены постоянному поступлению пирокластики, почвообразование имеет синлитогенный характер [3]. Такие слаборазвитые почвы на свежих вулканических выбросах по классификации почв России 2004 г. относятся к типу слоисто-пепловых (Vitric Andosols [12]).

Аналогичные почвы (почвоподобные тела – эпокочвы, выполняющие экологические и биосферные функции молодых инициальных почв, Vitric Andosols) Толбачинского дола описаны Гришиным и Шляховым [7]. На исследуемой территории профили почв представляют собой набор слоев пирокластических отложений, лишь часть из которых затронута педогенными процессами, но в небольшой степени.

В местах распространения почв данной группы еще до БТТИ лиственный лес отсутствовал, так как под поверхностным слоем шлака (от 10 до 50 см и более) не обнаруживается хорошо развитого гумусово-аккумулятивного горизонта. Его место занимает горизонт АС, представляющий собой коричнево-темно-серый песок, содержащий небольшое количество хорошо разложившегося органического вещества [7]. Других следов процесса почвообразования не прослеживается.

Для данной группы почв характерна актуальная кислотность среды от слабокислой до близкой к нейтральной (рН 5.9–6.9) [7]. Чем ближе к дневной поверхности находится погребенный горизонт, тем больше значения его актуальной кислотности. Наибольшими значениями актуальной кислотности рН (6.4–8.5) характеризуется верхний слой (тефра) БТТИ [7].

Содержание $C_{орг}$ в данных почвах очень низкое: в слоях основных пирокластических отложений до 1.8%, в горизонтах АС до 1.2% [7]. В поверхностном слое пирокластического материала БТТИ содержание $C_{орг}$ составляет всего 0–0.3%, но в верхних 1–2-сантиметровых корочках – не менее 0.3%, может достигать 3.5%.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор 16-ти образцов базальтов с двух лавовых потоков (Клешня и Алайд) проводили в 2018–2019 гг. (рис. 1). На каждой точке выполняли геоботаническое описание сообществ. Кроме участков на лавовых потоках, исследовали 46 проб верхнего горизонта почвы (тефры) со шлаковых полей. Все пробы отобрали методом конверта по 250–500 г.

Элементный состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на приборе EDX-8000P базе ресурсного центра “Методы анализа состава вещества” СПбГУ.

Коэффициенты концентраций для элементов, исследуемых методом РФА (Si, Al, Fe, Ca, Ti, K, Mn, Sr, Zr, Cu, Cr), рассчитывали по формуле: $K_c = K_i/K_b$, где K_i – концентрация конкретного элемента в данной пробе, K_b – региональный фон данного элемента в почвах восточного района северной провинции Камчатки (по [9]).

Для общей характеристики геохимических особенностей верхнего горизонта почвы вулканического плато Толбачинский дол рассчитывали суммарный геохимический показатель Z_c по формуле: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – количество элементов, превышающих региональный фон в пробе, более чем в 1.1 раза (по [4, 9, 22]). Для расчета показателя учитывали элементы, коэффициент концентрации которых был >1 .

Для более подробного анализа верхнего горизонта почвы с участков на разных лавовых потоках (16 проб) исключили элементы, не отражающие различия состава тефры (Fe, Si, Al, Ti, K, Sr, Zr), в анализ включили микроэлементы, которые не удалось зафиксировать методом РФА (исследовали Mn, Ca, Cu, Cr, Co, V, Ni, Li, Zn, P). Для этого воспользовались методом ICP-AES, как более чувствительный и точный. Измерения проводили на приборе ICP-9000 на базе ресурсного центра “Химия” СПбГУ. Для этого навески проб переводили в жидкую фазу стандартным методом кислотного разложения проб с использованием микроволновой печи [20].

Статистическую обработку данных проводили с помощью Microsoft Excel, пакета Statistica 7 и в программной среде R. Использовали корреляционный анализ (с применением коэффициента корреляции Пирсона).

Для сравнения элементного состава верхнего горизонта почвы (тефры) участков, находящихся на разных лавовых потоках, и определения влияния разного состава подстилающих базальтов на различия элементного состава тефры, более подробно рассматривали точки наблюдения, расположенные на участках лавовых потоков Клешня и Алайд. Методом анализа главных компонент (principal component analysis, далее PCA) изучили распределение элементного состава верхнего горизонта почвы и отдельно элементного состава погребенных базальтов.

Для описания различий между растительными сообществами на участках лавовых потоков Алайд и Клешня использовали алгоритм неметрического многомерного шкалирования (NMS, non-metric multidimensional scaling [15, 32]) в двух осях при уровне стресса $p < 0.08$. Ординация построена по родовому составу и проективному покрытию видов с вычислением коэффициента расстояния Брея-Кертиса. Затем вычисляли коэффициент детерминации R^2 между координатами точек описаний на осях NMS и характеристиками среды.

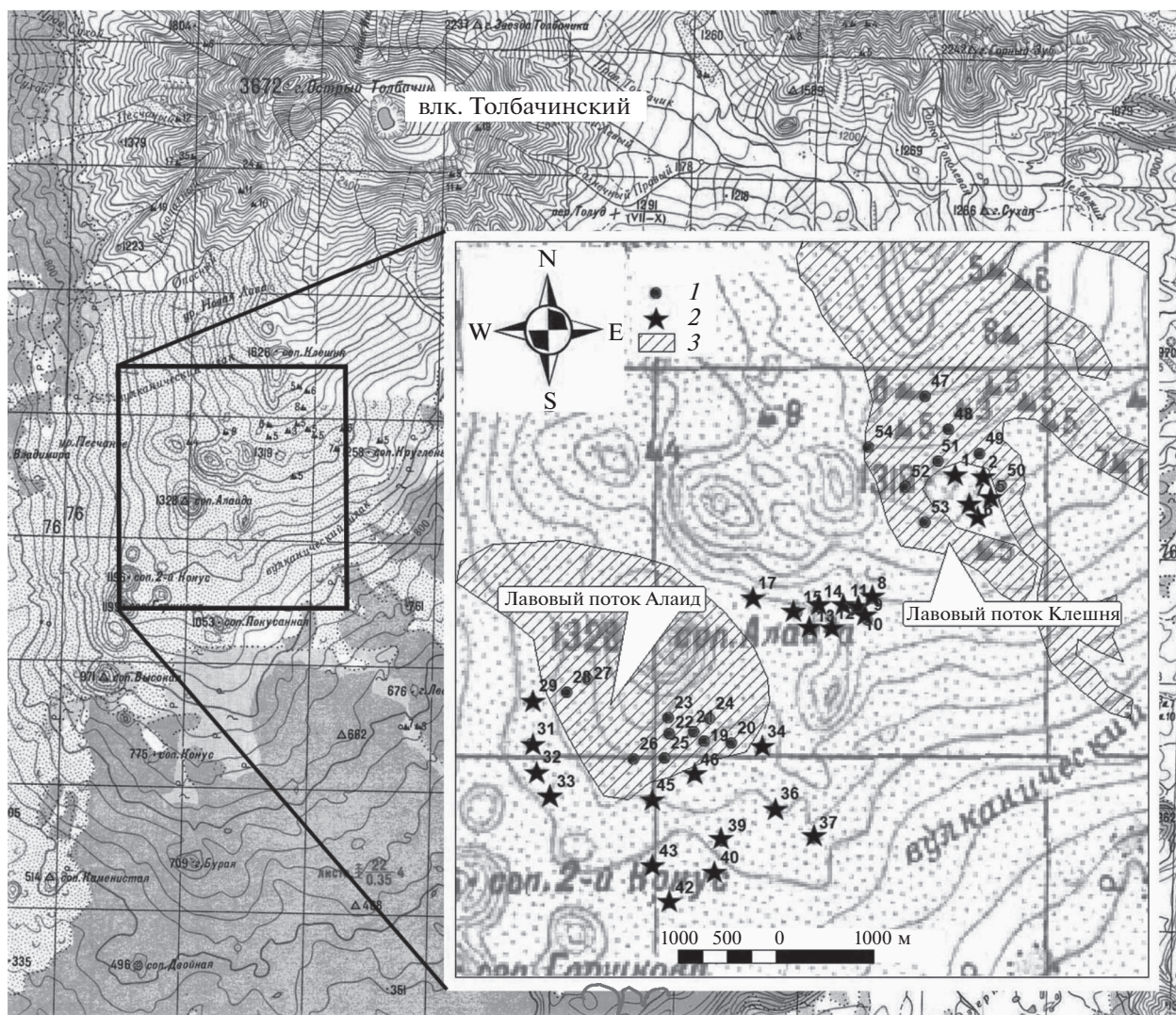


Рис. 1. Карта фактического материала: 1 – точки на лавовом плато, 2 – точки на шлаковом плато, 3 – контур лавовых потоков – контур лавовых потоков.

В качестве характеристик среды учитывали общее проективное покрытие растительности, в отдельности покрытие мохово-лишайникового и травяно-кустарничкового ярусов, обилие видов, расстояние до источников семян (уцелевших тундровых сообществ), микрорельеф точки наблюдения, размер обломков выходов лавы (что важно для мхов и лишайников, поскольку на подвижной тefре им сложнее закрепиться), абсолютную высоту точек наблюдения и др. Кроме того, в качестве факторов элементного состава почв использовали координаты первых двух осей PCA, полученных при анализе химического состава верхнего горизонта почв.

Все карты распределения элементов построены с помощью программы ArcGIS 10.1. Для построения карт распределения коэффициентов концентраций элементов K_c и суммарного геохи-

мического показателя Z_c использовали модуль Spatial Analyst. Для интерполяции данных (построения непрерывной поверхности) – метод обратного взвешенных расстояний [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Краткая характеристика почв исследуемой территории. Мощность тefры БТТИ на исследуемых точках наблюдения варьирует от 3 до >100 см. В районе выхода на дневную поверхность лавового потока Алайд средняя мощность тefры составляет 20 см (от 3 до 47 см). В районе лавового потока Клешня – от 17 до 100 см, средняя мощность тefры 40 см.

В большей степени поверхностный слой пирокластических отложений (С) характеризуется комковатой и ореховато-комковатой структурой, темной окраской (10YR 4/2, 7.5YR 3/2). Грануло-

метрический состав, определенный в поле органолептически, — преимущественно супесь, размер частиц до 10 см. Образцы погребенного грубогумусового горизонта (2АО) характеризуются непрочнокомковатой структурой, слабой цементированностью (предположительно, за счет растительного детрита), наличием корней, еще более темной окраской (10YR 3/2, 2.5 Y3/3). Гранулометрический состав супесчаный, однако размер частиц не превышает 5 см.

Геохимическая характеристика верхнего горизонта формирующейся почвы исследуемой территории. Почвенный профиль на участках лавовых потоков сформирован следующим образом: на поверхности залегает слой тефры БТТИ, составляющий от 3 до 100 см (в среднем 20 см по 18 наблюдениям). Под ней в 14 точках наблюдения находится погребенный переходный горизонт АС мощностью от 5 до 20 см, сформированный на более древней тефре (2С), в свою очередь залегающей на базальтовых потоках (D). В остальных точках наблюдения под слоем тефры БТТИ находятся более древние слои тефры, мощностью более 100 см.

Для верхнего горизонта почвы исследуемой территории наибольшие концентрации характерны для Si (медиана) 18%, Fe (7.8%), Ca (7.5%) и Al (7%), наименьшие наблюдаются у Zr (113), Cu (98 мг/кг).

Концентрации Al и Mn в 75–90% проб меньше регионального фона (табл. S1). Содержание K, Sr и Zr по всей исследуемой территории варьирует на уровне регионального фона. Повышенные концентрации K связаны с участками, где залегают лавовые потоки Клешня и Алаид, и с близлежащими к ним понижениями в микрорельефе.

Концентрации Fe, Ca и Ti по всей изучаемой территории превышают региональный фон примерно в 1.5 раза. Вероятно, повышенные концентрации данных элементов обусловлены тем, что они относятся к типоморфным для основных вулканитов и андезитовых приповерхностных пеплов исследуемой территории [27]. Пониженные концентрации данных элементов отмечены только в нескольких точках и, видимо, связаны с локальными превышениями микрорельефа и миграцией их по рельефу (на исследуемой территории элементы вымываются с повышенных участков и накапливаются в понижениях).

Значения показателя Z_c (рис. 2) увеличиваются от больших абсолютных высот к меньшим, вероятно, это связано с особенностями рельефа и миграцией элементов в локальные понижения. Участки на юге исследуемой территории, где показатель принимает пониженные значения, в основном связаны с локальными превышениями микрорельефа. Также наблюдается отрицательная корреляционная связь концентраций отдельных элементов с абсолютной высотой точек на-

блюдения (для Zn $r = -0.71$). Для исследуемых участков значение показателя Z_c не превышает 16, следовательно, данная территория характеризуется допустимым уровнем содержания данных элементов [21].

Наибольший вклад в изменение показателя Z_c вносят Sr, Cu, тогда как содержание элементов с большими концентрациями (Fe, Si, Al, Ti) изменяется не так значительно, поскольку они являются наиболее характерными и типичными для данных пород.

Различия элементного состава верхнего горизонта почвы на участках лавовых потоков Алаид и Клешня. По результатам PCA (по элементам Si, Al, Fe, Ca, Ti, K, Mn, Sr, Zr, Cu, Cr) образцы базальтов в пределах своих лавовых потоков различаются между собой в большей степени по главной компоненте (Factor 1) — содержанию Si и Al ($r = -0.91$ и -0.83 соответственно): лавы потока Клешня — глиноземистый базальт, для которого характерно большее содержание Al и Si, чем для магнезильного базальта потока Алаид (рис. 3).

Однако для верхнего горизонта почвы с тех же участков группировки по лавовым потокам несколько более размыты (рис. 4). Кроме того, главные компоненты, характеризующие распределение исследуемых элементов в данных пробах верхнего горизонта почв, не схожи с таковыми компонентами для лав.

Распределение элементов в верхнем горизонте почвы совершенно иное. Корреляции содержания Si, Ca, Ti, K, Mn, Sr, Fe, Al в тефре и лавах не наблюдается. Содержание Fe в верхнем горизонте почв с участков разных лавовых потоков практически не дифференцировано, в отличие от его содержания в самих лавах. Различие медиан содержания Ca, Ti, Sr гораздо больше для разных лавовых потоков, чем для покрывающей их тефры. Концентрация Cu наоборот более контрастна в верхнем горизонте почвы с разных участков, чем в самих лавах. Кроме того, в лавах в отличие от верхнего горизонта почв на соответствующих точках пробоотбора методом РФА не обнаружен Sr. Данные результаты закономерны, поскольку верхний слой почвы, образованный тефрой, и подстилающие лавы являются продуктами извержений разных конусов и, как упоминается в других исследованиях, могут существенно отличаться по химическому и минералогическому составу [24].

Таким образом, элементный состав верхнего горизонта почвы (тефры) не связан с элементным составом подстилающих лав.

По содержанию Mn, Ca, Cu, Cr, Co, V, Ni, Li, Zr, P, S состав верхнего горизонта почвы с точек наблюдения, находящихся на разных лавовых потоках, сильно различается (рис. 5). В большей степени это связано с главной компонентой, обу-

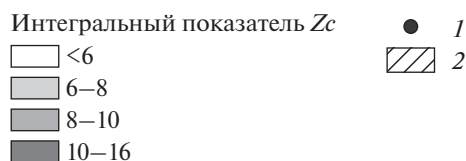
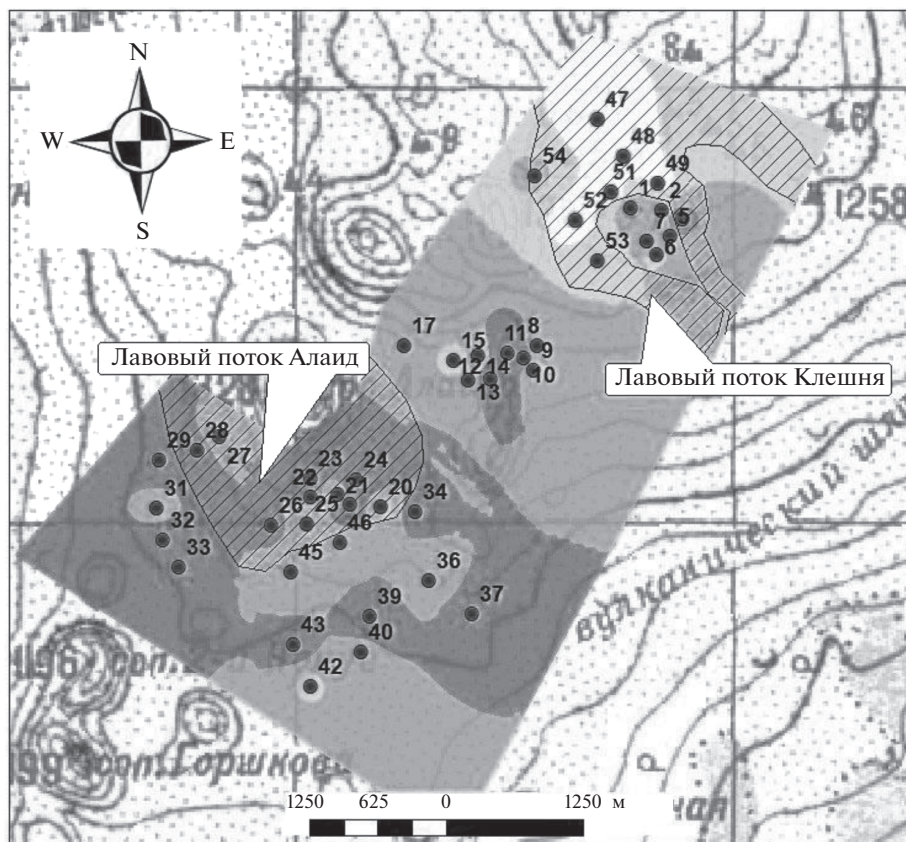


Рис. 2. Интегральная геохимическая карта распределения исследуемых элементов в верхнем горизонте почв вулканического плато Толбачинский дол: 1 – точка наблюдения, 2 – контур лавовых потоков, входящих на дневную поверхность.

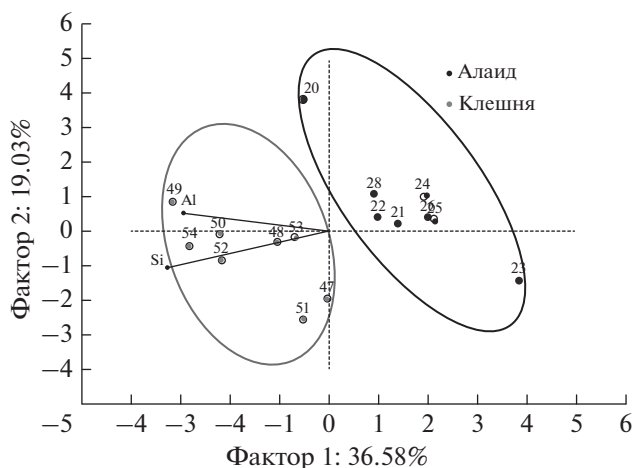


Рис. 3. Элементный состав образцов лав в плоскости двух главных компонент (по концентрациям Si, Al, Fe, Ca, Ti, K, Mn, Sr, Zr, Cu, Cr, полученным методом РФА). Factor 1 – 1 главная компонента, Factor 2 – 2 главная компонента.

словленной содержанием Li, и соответствующей оси PC1 на рис. 5 и 6.

По второй главной компоненте (PC2) состав верхнего горизонта почвы между участками разных лавовых потоков отличается гораздо меньше. Данная главная компонента обусловлена содержанием таких элементов, как Cr, Ni (имеют положительный вектор), а также P, Cu, Li (имеют отрицательный вектор).

Различия между растительными сообществами на участках лавовых потоков Алаид и Клешня. Растительные группировки на участках лавовых потоков Клешня и Алаид различаются в основном по проективному покрытию мхов и лишайников. Именно для участка на потоке Клешня более характерны пионерные виды мхов (*Polytrichum piliferum*, *Polytrichum juniperinum*), накипные лишайники и лишайник *Stereocaulon* sp., что предположительно связано с бóльшим количеством выходов

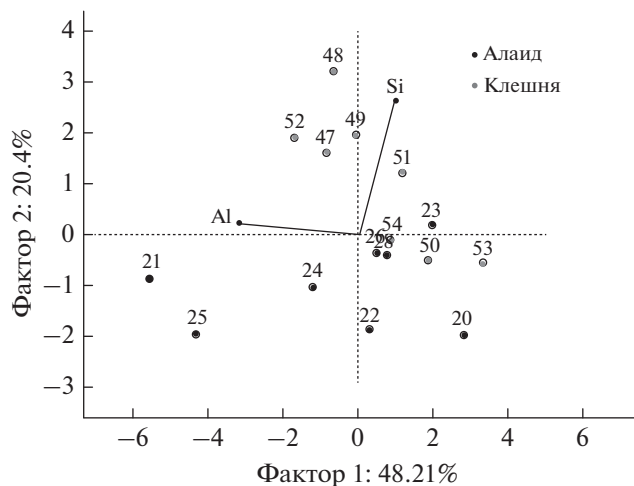


Рис. 4. Элементный состав образцов верхнего горизонта почв, формирующихся на разных лавовых потоках, в плоскости двух главных компонент (по концентрациям Si, Al, Fe, Ca, Ti, K, Mn, Sr, Zr, Cu, Cr, полученным методом РФА). Factor 1 – 1 главная компонента, Factor 2 – 2 главная компонента.

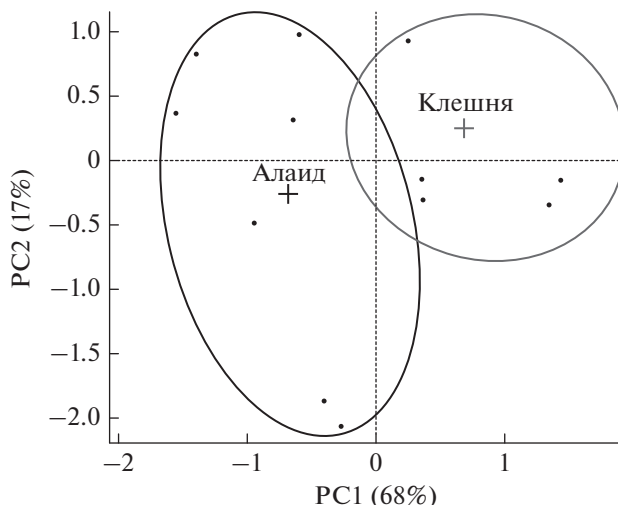


Рис. 5. Элементный состав образцов верхнего горизонта почв, формирующихся на разных лавовых потоках, в плоскости двух главных компонент PC1 и PC2 (по концентрациям Mn, Ca, Cu, Cr, Co, V, Ni, Li, Zn, P, S, полученным методом ICP-AES) – проекция точек наблюдения на фактор-плоскость.

лав на данном участке (на них им проще закрепиться, чем на подвижной тефре).

На рис. 7 приведены результаты анализа методом неметрического многомерного шкалирования, в качестве дополнительных переменных в анализ были добавлены значения главных компонент PC1 и PC2, характеризующих элементный состав верхнего горизонта почвы (сведения об элементном составе в виде двух значений), полученные при анализе распределения Mn, Ca, Cu, Cr, Co, V, Ni, Li, Zn, P, S в тефре. С основным градиентом (ось координат Axis1), который характеризует различие сообществ, положительно коррелирует абсолютная высота местности, увеличение поверхности выходов лавы, и отрицательно – удаленность от уцелевшей тундры. Поскольку сравнивали только участки на лавовых потоках, удаленные друг от друга, распределение сообществ по этой оси можно определить как различия в растительности на данных потоках.

Значение компоненты PC1, с которой связано уменьшение концентрации большинства элементов, частично коррелирует с основным градиентом Axis1, что, возможно, вносит вклад в различие растительных сообществ разных лавовых потоков.

Основной градиент Axis2 характеризует различия сообществ внутри группировок по лавам, в меньшей степени связанные с различиями условий между данными участками. Как видно на рис. 7, число видов и проективное покрытие сосудистых растений сильно коррелирует с главной компонентой PC2 ($r = -0.99$ и -0.96 соответственно).

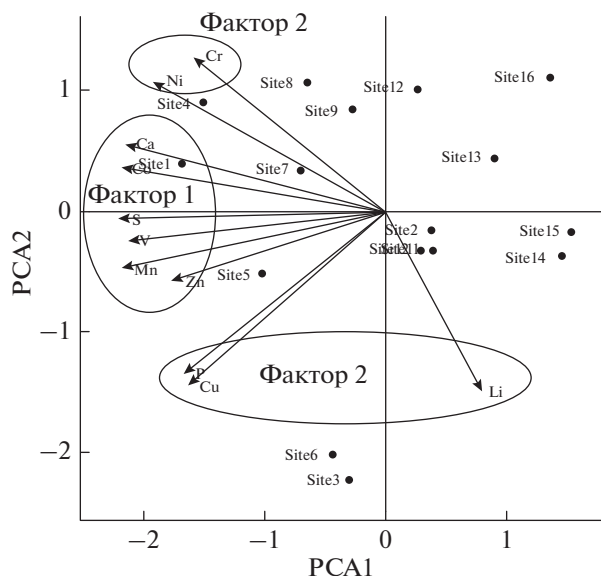


Рис. 6. Элементный состав образцов верхнего горизонта почв, формирующихся на разных лавовых потоках, в плоскости двух главных компонент PC1 и PC2 (по концентрациям Mn, Ca, Cu, Cr, Co, V, Ni, Li, Zn, P, S, полученным методом ICP-AES) – проекция переменных на фактор-плоскость.

ВЫВОДЫ

1. На всей исследуемой территории значения суммарного геохимического показателя Zc (рассчитанного по элементам Fe, Ca, Al, Ti, K, Mn, Sr, Zr, Cu, Cr) увеличиваются от больших абсолютных высот к меньшим. Максимальное значение (17) данный показатель принимает в точке, приуроченной к локальному понижению рельефа.

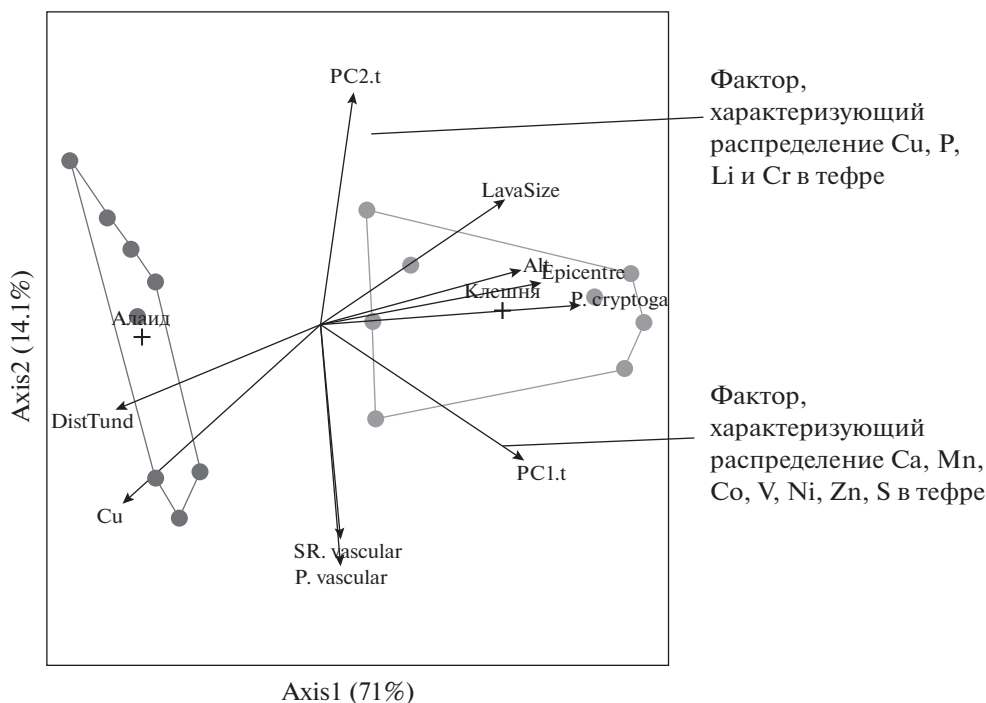


Рис. 7. Результаты анализа растительных сообществ, произрастающих на участках лавовых потоков Клешня и Алаид, методом неметрического многомерного шкалирования (NMS) с добавлением осей PC1, PC2 и содержания Cu. Векторами показаны наиболее скоррелированные ($R^2 > 0.33$, $p < 0.05$) с составом сообществ характеристик, где DistTund – удаленность от уцелевшей тундры, LavaSize – размер выходов лав, Alt – абсолютная высота, Epicentre – расстояние до эпицентра БТТИ, SR. vascular – число видов сосудистых растений, P. vascular – проективное покрытие сосудистых растений, P. cryptogam – проективное покрытие лишайников и мхов.

2. В верхнем горизонте почв, формирующихся на лавовых потоках Клешня и Алаид, распределение концентраций большинства микроэлементов, вероятно, определяется характером рельефа.

3. Пробные площади, расположенные на разных лавовых потоках, отличаются как по элементному составу верхнего горизонта почвы, так и по растительным сообществам. Однако данные различия не связаны с элементным составом лав, подстилающих тephру. Элементный состав верхнего горизонта почв (тефры) на участке потока Алаид отличается более высоким содержанием Ca, Mn, Co, V, Ni, Zn, S по сравнению с таковым на участке потока Клешня. Для группы растительных сообществ, произрастающих на участке лавового потока Клешня характерно большее проективное покрытие мхов и лишайников, чем для растительных сообществ участка лавового потока Алаид, что связано с более крупными выходами лав на участке потока Клешня. По видовому составу для участка на потоке Клешня более характерны пионерные виды мхов и накипные лишайники, чем для участка на потоке Алаид.

4. Различия между группами растительных сообществ, произрастающих на разных лавовых потоках, связаны больше с размером выходов лав (поскольку на них проще закрепиться лишайни-

кам и мхам) и рельефом изученных территорий, чем с элементным составом верхнего горизонта почвы и подстилающей лавы. Однако прослеживается сильная связь распределения Cu, P, Li, Sr с проективным покрытием и количеством видов сосудистых растений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Региональный фон химических элементов в почвах Восточного района Северной почвенной провинции Камчатки (по [9]), валовые содержания элементов в верхнем горизонте почв центральной части плато Толбачинский дол.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова Н.И., Тонконогов В.Д. Некоторые экспериментальные данные о выветривании вулканических пеплов Камчатки // Почвоведение. 1968. № 5. С. 43–55.
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Го-

- лоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 177–222.
3. *Васильев Н.Б.* Влияние продуктов вулканической деятельности на формирование почвенного профиля в юго-западном секторе Ключевской группы вулканов. ВКР. СПб.: РГПУ им. Герцена, 2019. 98 с.
 4. *Водяницкий Ю.Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 192 с.
 5. *Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернянский С.С., Пиковский Ю.И.* Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии // Почвоведение. 2007. № 6. С. 661–675.
 6. *Гирин О.А., Баженов Е.В.* Магнитные свойства базальтов Толбачинского дола // Евразийское научное объединение. 2015. Т. 2. № 5. С. 175–177.
 7. *Гришин С.Ю., Шляхов С.А.* Растительность и почвы Толбачинского дола (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Т. 2. № 14. С. 132–142.
 8. *Захарихина Л.В.* Особенности почвообразования, связанные с разными фазами активности вулканизма (на примере Камчатки) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2008. Вып. 62. С. 50–63.
 9. *Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщение 2. Специфика формирования элементного состава вулканических почв в холодных гумидных условиях // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 25–33.
 10. *Зонн С.В., Карпачевский Л.О., Стефин В.В.* Лесные почвы Камчатки. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
 11. *Карпачевский Л.О., Алябина И.О., Захарихина Л.В., Макеев А.О., Маречек М.С., Шоба С.А.* Почвы Камчатки. М., 2009. 382 с.
 12. *Ковда В.А., Розанова Б.Г.* Почвоведение. Ч. 1. Почва и почвообразование. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.
 13. *Кораблев А.П.* Формирование лесной растительности на вулканогенных отложениях Камчатки (на примере Толбачинского дола). Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2011. 319 с.
 14. *Кораблев А.П., Смирнов В.Э., Нешатаева В.Ю., Ханина Л.Г.* Жизненные формы растений и экопический отбор в ходе первичной сукцессии на вулканических субстратах (Камчатка, Россия) // Известия РАН. Сер. биологическая. 2018. № 3. С. 290–300.
 15. *Краскел Дж.Б.* Многомерное шкалирование и другие методы поиска структуры // Статистические методы для ЭВМ. Уилфа. М.: Наука, 1986. С. 301–347.
 16. *Лебедев С.В., Нестеров Е.М.* Пространственное ГИС-моделирование геоэкологических объектов в ArcGIS. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. 259 с.
 17. *Ливеровский Ю.А.* О вулканических пепловых почвах Камчатки // Почвоведение. 1971. № 6. С. 3–11.
 18. *Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Почвенные провинции Камчатки и их геохимическая характеристика // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2008. Т. 1. № 11. С. 98–112.
 19. *Маречек М.С.* Пространственные закономерности вулканического педоседиментогенеза на территории Камчатки (компьютерная модель). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2007. 23 с.
 20. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии М-МВИ-80-2008. СПб, 2008.
 21. СанПиН 2.1.7.728-99. Методические указания 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. 1999. <https://legalacts.ru/doc/sanpin-217728-99-217-pochva-ochistka-naselennykh-mest>
 22. *Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
 23. *Соколов И.А.* Вулканизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
 24. *Федотов С.А.* Введение // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 5–10.
 25. *Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цюрупа А.И.* Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 223–276.
 26. *Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Флеров Г.Б., Ивамори Х., Накамура Х., Нишизава Т.* Петрологическая, геохимическая и изотопная эволюция Толбачинского вулканического массива // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 131–170.
 27. *Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Эдвардс Б.Р., Пономарева В.В., Зеленин Е.А.* Ключевская группа вулканов и Толбачинский вулканический массив: итоги исследований четвертичного вулканизма предшествующих извержению 2012–2013 гг. // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 31–71.
 28. *Churikova T., Dorendorf F., Wörner G.* Sources and Fluids in the Mantle Wedge below Kamchatka, Evidence from Across-arc Geochemical Variation // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 1567–1593.
 29. *Clunes J., Dörner J., Pinochet D.* How does the functionality of the pore system affect inorganic nitrogen storage in volcanic ash soils? // Soil Tillage Res. 2020. V. 205. 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104802>
 30. *Hjartardottir A.R., Einarsson P.* Tectonic position, structure, and Holocene activity of the Hofsjökull volcanic system, central Iceland // J. Volcanology Geothermal Res. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107277>.
 31. *Krashennikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V.* Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // J. Volcanology Geothermal Res. 2020. V. 408. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107088>

32. *Kruskal J.B.* Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method // *Psychometrika*. 1964. V. 29. P. 115–129.
33. *Martínez-Cortizas A., Novoa J.C., Pontevedra X., García-Rodeja E.* Elemental composition of Reference European Volcanic Soil // *Soils of Volcanic Regions in Europe*. 2007. P. 289–306.
34. *Oskarsson B.V., Riishuus M.S., Arnalds O.* Climate-dependent chemical weathering of volcanic soils in Iceland // *Geoderma*. 2012. V. 189–190. P. 635–651. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.030>
35. *Takahashi T., Dahlgren R.A.* Nature, properties, and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils // *Geoderma*. 2016. V. 263. P. 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032>
36. *Tsui Ch., Tsai Ch., Chen Z.* Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan // *Geoderma*. 2013. V. 209–210. P. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013>
37. *Ugolini C.F., Dahlgren A.* Soil Development in Volcanic Ash // *Global Environ. Res.* 2002. V. 6. P. 69–81.

Ecological and Geochemical Features of Soils of the Tolbachinsky Dol Volcanic Plateau

N. A. Bilaya^{1, 2}, A. P. Korablev², P. S. Zelenkovsky¹, and S. N. Chukov^{1, *}

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

² Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 197376 Russia

*e-mail: s_chukov@mail.ru

The study of the geochemical features of the volcanic soils Vitric Andosols in the central part of the Tolbachinsky Dol plateau near the Kleshnya and Alaid lava flows was carried out to determine the relationship between the elemental composition of parent rocks and the soils and vegetation that form on them. The elemental composition of the samples was determined by X-ray fluorescence analysis and ICP-AES. For statistical data processing, we used correlation analysis, principal component analysis, and non-metric multidimensional scaling (Statistica 7, software environment R). The distribution of elements in soils is largely determined by the relief. The concentrations of Fe, Ca and Ti throughout the study area exceed the regional background for the eastern region of the northern soil province of Kamchatka. Differences between plant communities growing on different lava flows are associated more with the macro-relief and size of outcrops of lava debris than with the elemental composition of soils and underlying lava. However, there is a strong relationship between the distribution of Cu, P and the number of species and projective cover of vascular plants.

Keywords: basaltic tephra, The Great Tolbachik fissure eruption, Vitric Andosols, Zc index, pyroclastic material