

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ НА ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНЕ АЛЯТ (АЗЕРБАЙДЖАН)

© 2022 г. Ш. Г. Исаева^{1,*}, И. В. Лянгузова^{2,**}, Ш. Н. Гасымов¹, Р. Т. Абдыева¹

¹ Институт ботаники НАН Азербайджана
Бадамдарское шоссе, 40, Баку, Az1004, Азербайджанская Республика

² Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН
ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376, Россия

*e-mail: s.isayeva@botany.science.az

**e-mail: ILyanguzova@binran.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 16.08.2022 г.

В работе представлены результаты изучения разнообразия растительных сообществ, встречающихся на территории грязевого вулкана Алят (40°05′2.85″ с.ш., 49°1′99.42″ в.д., Азербайджан), а также оценки миграции тяжелых металлов в системе почва–доминирующие виды растений. На ключевых участках от вершины вулкана до его основания сделаны геоботанические описания, отобраны доминирующие виды растений и образцы почвы. Методом эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой в почвенных и растительных образцах определено содержание Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Al, Ni, Pb и Zn. Установлено, что флора и растительность вулкана по сравнению с окружающей ценофлорой характеризуются более низким богатством видового (11 видов) и таксономического разнообразия, общее проективное покрытие в растительных сообществах не превышает 25%. В растительных сообществах на территории грязевого вулкана, в основном, присутствуют солеустойчивые виды, относящиеся к типичным галофитам. В поверхностном слое почвы (0–20 см) ключевых участков концентрации металлов располагаются в убывающем ряду: Fe > Al > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Cd. Несмотря на высокую степень засоления территории грязевого вулкана, концентрации большинства металлов не превышают их регионального фонового содержания, за исключением Zn и Cd. Доминирующие виды растений [*Caroxylon dendroides* (= *Salsola dendroides*), *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum* (= *Salsola nodulosa*)] характеризуются специфичностью в поглощении исследованных металлов и отличаются слабой миграцией элементов из почвы в растение, коэффициенты биологического накопления не превышают 0.3, т.е. это типичные виды-исключатели.

Ключевые слова: грязевой вулкан, тяжелые металлы, коэффициент биологического поглощения, флора, растительные группировки, солянки, эфемеры

DOI: 10.31857/S0006813622100039

Деятельность грязевых вулканов формирует уникальные природные ландшафты, растительность которых представлена различными стадиями первичной сукцессии. На территории Азербайджана повышенный радиационный баланс (40.4–48 ккал/см² в год) и пониженная относительная увлажненность (20–50%) обусловили доминирование злаково-разнотравной эфемеровой растительности с участием *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* (Link) Arcang., *Bromus japonicus* Thunb., *Eremopyrum oirientale* (L.) Jaub. et Spach и разнотравья *Spergularia diandra* (Guss.) Heldr., *Calendula arvensis* (Vaill.) L., *Psylliostachys spicata* (Willd.) Nevski и др. (Апшеронский полуостров); душистопопынно-древовидносолянковых *Caroxylon*

dendroides+*Artemisia fragrans* сообществ (Западный Гобустан) и растительных сообществ солянковой пустыни из *Suaeda microphylla* Pall. (Восточный Гобустан) на сероземно-бурых, сероземно-бурых солонцеватых, сероземных почвах (Vudagov, 1988). Однако вопросы формирования, развития, дифференциации и морфологии грязевулканических ландшафтов пока исследованы довольно слабо. Изучение различных аспектов трансформации растительности и отдельных эдификаторных и доминантных видов растительных сообществ в результате деятельности грязевых вулканов – важная и актуальная задача, которая открывает также и биоиндикационные возмож-

ности для оценки среды и грязевулканической активности (Koranina, 2019).

Грязевой вулканизм – природное явление, которое представлено во всех регионах мира. Масштабы извержений грязевых вулканов меньше, по сравнению с магматическими вулканами, но происходят эти извержения чаще (с периодичностью в единицы и десятки лет). Важной особенностью грязевулканических ландшафтов является их динамичность, которая во многом определяется именно деятельностью вулкана – интенсивностью и частотой извержений. Территория Азербайджана является уникальным на Земле регионом по количеству расположенных здесь грязевых вулканов, их разнообразию и проявлениям активной деятельности. В общей сложности грязевые вулканы страны составляют 45% от числа всех вулканов в мире. На территории Азербайджана встречаются все формы проявления грязевого вулканизма – действующие (70%), потухшие, погребенные, подводные, островные, нефтяные. Некоторые вулканы-гиганты, особенно часто встречающиеся на территории Азербайджана, имеют высоту 400–450 м, площадь их кратерной площадки достигает 900–1000 м², а общий объем твердых выбросов в момент извержения превышает 2400 млн. м³. Особо крупных размеров достигают грязевые вулканы Алятской гряды – Туорогай, Большой Кянизадаг, Дашгиль, Котурдаг, Айрантекан, Кара-кюре, Солахай и др. (Kholodov, 2012). Наибольшую площадь грязевулканические ландшафты занимают в Гобустане (Kerimova, 2010). В материале, слагающем сопочную брекчю грязевых вулканов, выделяют обломки пород или автокластиты, сопочный шлам и сопочный пелит (сопочный ил). На долю автокластитов обычно приходится не более 5% от всей массы твердых выбросов грязевых вулканов. Встречаются автокластиты, в основном, среди выбросов крупных, морфологически развитых грязевых вулканов, в то время как в выбросах грязевых сопков, грифонов и сальз они отсутствуют или отмечаются в незначительных количествах. Сопочный шлам имеет гетерокластическую структуру и состоит из мелких обломков, образовавшихся в результате механической обработки кластического материала, а также глинистой и известково-глинистой массы. Сопочный пелит является продуктом извержения, характерным для грифонов и сальз, и формируется в результате более продолжительного действия жидкой и газовой фаз на шламовый материал (Gadgiyeva et al., 2021).

Грязевые вулканы являются природными источниками повышенной экологической опасности. Прежде всего это выбросы вулканами токсичных химических веществ. Грязевулканические воды и брекчии обогащены микроэlemen-

тами и токсичными металлами (Hg, As, Li, B, Mo, Sr, Yb, Pb), концентрации которых выше кларковых. Поступая на поверхность, солевые растворы приводят к формированию литогенной основы с высоким солесодержанием и более интенсивному развитию на ней по сравнению с окружающими территориями галофитной растительности (*Climacoptera crassa* (M. Bieb.) Botsch., *Suaeda acuminata* (C.A. Mey) Moq., *S. altissima* (L.) Pall.) (Akhmedov, 1985).

Галофиты существуют в условиях засоленности почвы, постоянной почвенной и атмосферной сухости, перегрева, резких суточных колебаний температур, интенсивной инсоляции, сильных ветров (Berezina, 2009). Эугалофиты накапливают NaCl в надземной части, криногалофиты выделяют соли на поверхность листьев, псевдогалофиты ограничивают или избегают поступления соли (Genkel, 1982). Для истинных (облигатных) галофитов соль оказывает благотворное влияние, гликофиты и факультативные галофиты чувствительны к соли, их рост и продуктивность снижаются на засоленной почве. Экологическая дифференциация галофитов основана на разных стратегиях адаптации к засолению на уровне целого растения, органов, тканей и клетки. У эугалофитов осморегуляторную роль выполняют ионы Na⁺, а у криногалофитов – низкомолекулярные осмолиты, такие как пролин, бетаин, сахара и др. (Rozenstvet et al., 2017).

Хорошо известно, что для нормальной жизнедеятельности растениям помимо основных и макроэлементов (C, N, S, P, Ca, Mg, K) необходимы различные микроэлементы (Fe, Mn, Cu, Mo, Zn и др.), которые в зависимости от концентрации могут рассматриваться и как токсичные тяжелые металлы (Kuznetsov, Dmitrieva, 2011). Современная классификация микроэлементов разделяет по их значимости для живых организмов на следующие группы: 1) жизненно необходимые – Fe, Mn, I, Cu, Zn, Co, Cr, Mo, Se; 2) условно необходимые – Li, B, Ni, V, Si, F, Br, Ti; 3) токсичные – Be, Al, Cd, Pb, Hg, Ba, Tl, Bi и др. (Rebrov, Gromova, 2008). Повышенные концентрации микроэлементов, превышающие необходимое для жизнедеятельности растений количество, оказывают токсическое действие, приводят к ингибированию роста, хлорозам и некрозам листьев, карликовости растений.

Учитывая вышеизложенное, в задачи настоящей работы входило: 1) изучение разнообразия растительных сообществ, встречающихся на территории вулкана Алят; 2) определение содержания тяжелых металлов в доминирующих видах растений и почве; 3) оценка миграции тяжелых металлов в системе почва–растение.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Грязевой вулкан Алят шпорообразной формы расположен в 57 км к юго-западу от Баку и в 6 км к северо-востоку от железнодорожной станции и в окрестностях поселка Алят (Кура–Аразская низменность), на побережье Каспийского моря на высоте 181 м над ур. моря (рис. 1). Относительная высота вулкана около 26–27 м. Его усеченный, сильно оголенный конус с 15-метровым кратерным останцем сложен грязевулканической брекчией. Площадь брекчиевого покрова 143.8 га, его мощность у центра извержения 70 м, на окраине – 20 м.

Климат в районе исследования преимущественно с мягкой зимой и сухим жарким летом. Годовое количество солнечной радиации составляет 2200–2400 час/год. Этот район отличается наименьшим количеством осадков (200–400 мм), но является самым ветреным регионом страны. Среднегодовая скорость ветра составляет 4–6 м/сек. и более (Mamedov et al., 2010).

В районах извержения грязевых вулканов на высоте 100–300 м над ур. моря формируются серо-бурые почвы, почвообразующая порода – горная брекчия грязевого вулкана (Aliyev et al., 2015). Характерными чертами этих почв являются засоленность и высокая карбонатность, реакция почвенного раствора сильнощелочная (рН = 8.7–9.0); гранулометрический состав почв – средне-глинистая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено в июне 2017 г. и состояло из двух этапов: 1) изучение растительности (видовой состав, доминирующие виды, растительные группировки и их размещение); 2) изучение содержания Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Al, Ni, Pb, Zn в почвах и доминирующих видах растений.



Рис. 1. Грязевой вулкан Алят.

Fig. 1. Mud volcano Alat.

Ключевые участки были заложены от эруптивного центра вниз по склону, ключевой участок 4 – незагрязненный участок, контроль (табл. 1).

На каждом ключевом участке были заложены пробные площадки размером 5×5 м, число которых зависело от встречаемости растений. На каждой площадке проводили описание видового состава с указанием обилия каждого вида (Braun-Blanquet, 1964), а также учитывали местоположение площадок по отношению к основанию вулкана (вершина/кратер, верхняя часть склона, средняя часть склона, нижняя часть склона, подножие-депрессия), крутизну и экспозицию склона. Для идентификации видов использовали базу данных World Checklist of Vascular Plants (WCVP). Растительные сообщества выделяли при общем проективном покрытии: для трав и кустарничков >25%; для кустарников >15%. При меньших по-

Таблица 1. Местоположение ключевых участков и доминирующие виды растений

Table 1. Location of key areas and dominant plant species

№ ключевого участка Number of key area	Координаты Coordinates	Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	Расстояние от эруптивного центра вниз по склону, м Distance from the eruptive center down the slope, m	Доминирующий вид Dominant species
1	N 40°05'2.85" E 49°1'99.42"	181	0	Нет растительности No vegetation
2	N 39°59'8.16" E 49°2'42.02"	97	15–20	<i>Caroxylon dendroides</i> (Pall.) Tzvel.
3	N 39°59'8.21" E 49°2'42.25"	93	30	<i>Suaeda microphylla</i> Pall.
4	N 39°59'8.03" E 49°2'40.09"	78	65 (подножие/base)	<i>Caroxylon nodulosum</i> Moq.

казателях объекты исследования рассматривали как растительные группировки.

Для изучения химического состава растений и поверхностного слоя почвы (0–20 см) на ключевых участках отбирали образцы доминирующих видов растений в 4-кратной повторности и пробы поверхностного слоя почвы в 3-кратной повторности. В дополнение к почвенным пробам отбирали в 3-кратной повторности образцы почвы непосредственно из корнеобитаемого слоя (ризосферы) доминирующих видов растений. Всего для химического анализа отобрано 12 проб растительного материала и 21 почвенный образец.

В лаборатории образцы растений тщательно промывали сначала водопроводной, а затем деионизированной водой для удаления пыли и частиц почвы. Образцы растений сушили в сушильном шкафу (24 ч при 105°C), измельчали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Образцы почвы были высушены на воздухе и просеяны через сито из нержавеющей стали с диаметром отверстий 1 мм для удаления камней и корней растений. К навеске 300 мг растительного или почвенного образца добавляли 5 мл конц. HNO_3 и 3 мл 30-процентного раствора H_2O_2 . Мокрое озоление образца проводили в установке для микроволнового разложения (Berghof Speedwave). Охлажденный раствор доводили до объема 25 мл деионизированной водой. В полученном растворе определяли содержание Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Al, Ni, Pb и Zn методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-ОЭС) в лаборатории Института им. Р.Т. Эрдогана (г. Ризе). Все анализы проводили в 3-кратной повторности с контролем точности измерений по стандартным образцам.

Для оценки миграции исследуемых металлов из поверхностного слоя почвы в доминирующие виды растений рассчитывали коэффициент биологического поглощения, который представляет собой отношение содержания элемента в растении к его содержанию в почве (Perel'man, 1989).

Статистическая обработка полученных результатов включала методы описательной статистики и ANOVA. Для оценки достоверности различий использовали непараметрические критерии Краскела–Уоллиса (H) и Манна–Уитни (z).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ввиду высокой засоленности почвы (Abduev, 2003) большинство растений характеризуется солеустойчивостью, и они относятся к типичным галофитам. Основными сообществами на прилегающей к вулкану территории являются солянки с доминированием *Suaeda microphylla* Pall., *S. acuminata* (C.A. Mey.) Moq., *S. altissima* (L.) Pall. и полукустарничковые солянковы (*Caroxylon*



Рис. 2. Многолетнесолянковые сообщества на грязевом вулкане Алят. На переднем плане *Caroxylon dendroides* (Pall.) Tzvelev.

Fig. 2. Perennial halophyte communities on the Alay mud volcano. *Caroxylon dendroides* (Pall.) Tzvelev in the foreground.

dendroides (Pall.) Tzvel., *C. nodulosum* Moq., *Reaumuria alternifolia* (Labill.) Britte, *Frankenia hirsuta* L.) с синюзиями однолетних и многолетних злаков (*Bromus japonicus* Thunb., *Eremopyrum orientale* (L.) Jaub. et Spach, *Aeluropus littoralis* (Gouan) Parl.) и разнотравья (*Spergularia diandra* (Guss.) Heldr. et Sart., *Plantago notata* Lag., *Psylliostachys spicata* (Willd.) Nevski) (рис. 2, 3). В растительном покрове с низкими значениями обилия присутствуют такие полукустарнички, как *Artemisia fragrans* Willd., *Halocnemum strobilaceum* (Pall.) M. Bieb., *Kalidium caspicum* (L.) Ung.-Sternb. Всего насчитывается 25 видов сосудистых растений.

Изучение растительного покрова самого вулкана показало, что его флора и растительность по сравнению с окружающей ценофлорой характеризуются более низким богатством видового и таксономического разнообразия. Видовой состав насчитывает 11 видов (табл. 2). Из них 3 вида (27%) – лекарственные растения флоры Азербайджана, 6 видов (54%) являются индикаторами высокого засоления, что указывает на присутствие солей как в глубоких, так и поверхностных корнеобитаемых слоях почвы. Виды *Halocnemum strobilaceum*, *Kalidium caspicum* являются индикаторами хлоридного, а *Caroxylon nodulosum*, *Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla* сульфатного засоления (Abduev, 2003). Общее проективное покрытие в растительных сообществах составляет <25%.

Основными растительными группировками вулкана являются *Halocnemum strobilaceum* + *Caroxylon dendroides* (верхняя часть склона, 181 м над ур. моря), *Halocnemum strobilaceum* + *Kalidium*



Рис. 3. Сообщества *Caroxylon nodulosum* Moq. на грязевом вулкане Алят.

Fig. 3. Communities of *Caroxylon nodulosum* Moq. on the Alat mud volcano.

caspicum (средняя часть склона, 107–121 м над ур. моря), + *Bromus japonicus* + *Herbosa* (нижняя часть склона, 78–95 м над ур. моря), у подножия вулкана в депрессии – *Suaeda microphylla* + *Bromus japonicus* + *Herbosa* и + *Bromus japonicus* + *Herbosa*. С повышением от основания к кратеру вулкана наблюдаются смена доминантов и изменение фитоценотической роли присутствующих здесь видов. По градиенту высоты от депрессии до кратера значимость *Caroxylon nodulosum* Moq., *Suaeda microphylla* Pall., *Halocnemum strobilaceum* (Pall.) M. Bieb., злаков и травянистых растений значительно снижается, а *Caroxylon dendroides* (Pall.) Tzvel. сохраняется.

Оценка содержания ряда химических элементов в поверхностном слое (0–20 см) почв ключевых участков грязевого вулкана показала, что концентрации металлов располагаются в убывающем ряду: Fe > Al > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Cd (табл. 3). Сравнительный анализ по критерию Краскела–Уоллиса не выявил значимых различий в содержании ни одного исследуемого металла в почвах ключевых участков, т.е. в почвах всех ключевых участков содержится одинаковое количество каждого из перечисленных металлов, несмотря на достаточно широкий диапазон варьирования содержания химических элементов. Как видно из данных табл. 3, концентрации большинства металлов не превышают их регионального фоновое содержание, за исключением Zn и Cd. В почвах ключевых участков содержание цинка в среднем в 2 раза, а кадмия в 10 раз превышает их региональные фоновые значения.

Проведенный анализ по непараметрическому критерию Манна–Уитни не выявил достоверных различий в содержании всех исследуемых металлов в образцах почв ключевых участков и в образцах, взятых в корнеобитаемом слое почвы. Из сказанного следует, что химический состав почвы не оказал влияния на произрастание доминирующих видов растений на ключевых участках грязевого вулкана Алят, и он не связан со сменой доминирующих видов по склону вулкана.

Оценка содержания исследуемых металлов в доминирующих видах растений грязевого вулкана выявила избирательность и специфичность в накоплении отдельных элементов. Специфичность видов в накоплении металлов проявляется как в суммарном содержании всех исследуемых металлов, так и в концентрациях отдельных элементов (рис. 4, табл. 4). Наименьшие величины содержания металлов наблюдаются у *Suaeda microphylla*, а максимальные – у *Caroxylon nodulosum*, что отражается в достоверных различиях в суммарном содержании всех исследуемых металлов ($H = 7.00$, $p = 0.03$). Концентрации металлов во всех исследуемых видах растений располагаются в убывающем ряду: Al > Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Co, и эта последовательность в содержании отдельных металлов отличается от убывающего ряда концентраций в поверхностном слое почв ключевых участков (табл. 3, 4). Примерно 50% от суммарного содержания приходится на долю Al и 43–44% – на долю Fe, относительное содержание остальных элементов варьирует от 0.01 до 3.7% от их суммарного содержания. Как показывают данные табл. 4, содержание большинства металлов в доминирующих видах растений находится в пределах нормального их содержания в растениях. Содержание Cd примерно в 3 раза превышает нормальное его содержание, но не достигает пределов избыточного его содержания. Концентрация Cr существенно превышает нижний предел его токсического содержания в растениях.

Оценку миграции металлов из почвы в растение проводили на основе коэффициента биологического поглощения. Наименьшими значениями этого показателя отличаются Co, Pb, Fe (0.03–0.05), наибольшими – Zn, Cd, Cu (0.27–0.31), для остальных элементов они находятся в пределах 0.08–0.15 (рис. 5). У доминирующих видов растений (*Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum*) коэффициенты биологического поглощения всех исследуемых элементов варьируют в узком интервале значений и достоверно не различаются между видами растений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Территория грязевого вулкана Алят характеризуется высокой степенью засоления, содержание

Таблица 2. Характеристика доминирующих видов растений
Table 2. Characters of dominant plant species

Вид Species	Жизненная форма Life form	Экотип Ecolype	Значение Importance and use
Chenopodiaceae Vent.			
<i>Caroxylon dendroides</i> (Pall.) Tzvel.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	Важный компонент зимних пастбищ, индикатор засоленных и деградированных почв, подземных водоемов A very important component of winter pastures, an indicator of degraded and saline soils, groundwaters
<i>Caroxylon nodulosum</i> Moq.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	Наиболее важный компонент зимних пастбищ The most important component of winter pastures
<i>Suaeda microphylla</i> Pall.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	Компонент зимних пастбищ на солончаках. Сырье для получения поташа A component of winter pastures on salt marshes. Raw material for potash production
<i>Halocnemum strobilaceum</i> (Pall.) M. Bieb.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	Важный компонент зимних пастбищ. Используется для производства поташа. Оказывает токсическое действие на вредителей растений. Встречается на влажных солончаках An important component of winter pastures. Used to produce potash. Has a toxic effect on plant pests. Occurs on wet and hilly salt marshes
<i>Kalidium caspicum</i> (L.) Ung.-Sternb.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	В осенне-зимний период может служить кормом для скота. Ранее использовали для получения поташа Can serve as a livestock fodder in autumn-winter period. Formerly used to produce potash
Tamaricaceae Link			
<i>Reaumuria alternifolia</i> (Labill.) Britten	полукустарничек dwarf semishrub	ксерогалофит xerohalophyte	—
Poaceae Barnhart			
<i>Aeluropus litoralis</i> (Gouan) Parl.	многолетник корневищный rhizomatous perennial	галоксеромезофит haloxeromesophyte	Полезное растение для борьбы с эрозией; встречается в очень засушливых условиях, в низинах, на засоленных глинистых почвах A useful plant for erosion control, occurs in very dry conditions, in lowlands, in saline areas, on heavy clay soil
<i>Bromus japonicus</i> Thunb.	однолетник annual	ксерофит xerophyte	Вредный сорняк зерновых полей. Не переносит щелочных почв A noxious weed in grain fields. Does not tolerate alkaline soils
Plumbaginaceae Juss.			
<i>Psylliostachys spicata</i> (Willd.) Nevski	однолетник annual	галоксерофит haloxerophyte	—
Plantaginaceae Juss.			
<i>Plantago notata</i> Lag.	однолетник annual	ксерофит xerophyte	—
Compositae Giseke			
<i>Artemisia fragrans</i> Willd.	полукустарничек dwarf semishrub	ксерофит xerophyte	—

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах ключевых участков на грязевом вулкане Алят
Table 3. Content of heavy metals (mg/kg) in soils of key areas of the mud volcano Alat

Металл Metal	КУ1 Key area 1	КУ2 Key area 2	КУ3 Key area 3	КУ4 Key area 4	Фоновое содержание в земной коре* Background content in the Earth's crust	H (p)
Fe	27900 ± 3205* (21730–32485)	30230 ± 2485 (20025–36675)	32490 ± 930 (29930–36645)	31805 ± 965 (28475–34985)	50000	1.50 (0.68)
Al	13250 ± 1233 (10815–14790)	24990 ± 6075 (8510–51800)	27020 ± 6245 (11945–55270)	14360 ± 1600 (8510–19390)	н. д.	6.96 (0.07)
Mn	535 ± 87 (405–700)	517 ± 68 (334–810)	548 ± 26 (473–641)	612 ± 45 (500–811)	950	2.52 (0.47)
Zn	156 ± 5 (148–164)	167 ± 20 (86–221)	147 ± 19 (78–201)	129 ± 23 (79–221)	70	1.15 (0.77)
Cr	65.2 ± 7.0 (51.2–72.5)	69.6 ± 6.1 (48.0–89.6)	72.8 ± 3.1 (60.5–80.3)	76.2 ± 1.0 (73.2–79.3)	100	3.18 (0.36)
Pb	48.5 ± 3.9 (43.5–56.2)	46.7 ± 5.9 (29.8–63.9)	43.5 ± 5.0 (27.0–60.0)	41.9 ± 6.2 (26.0–63.9)	13	0.83 (0.84)
Cu	40.2 ± 6.0 (28.2–47.1)	39.7 ± 4.3 (24.0–49.4)	42.8 ± 1.2 (37.5–46.5)	49.3 ± 6.2 (40.6–79.3)	55	0.53 (0.91)
Ni	34.9 ± 3.4 (28.2–39.2)	33.6 ± 2.8 (22.7–41.2)	38.4 ± 1.2 (35.8–43.1)	40.3 ± 1.5 (33.9–44.7)	75	5.57 (0.13)
Co	12.6 ± 1.2 (10.2–14.0)	11.9 ± 1.0 (9.1–14.6)	14.2 ± 0.9 (10.5–17.1)	14.1 ± 0.4 (12.4–15.3)	25	6.11 (0.11)
Cd	2.2 ± 0.5 (1.3–2.7)	2.2 ± 0.4 (0.7–3.3)	2.1 ± 0.3 (0.7–2.7)	2.4 ± 0.2 (2.0–3.3)	0.2	0.66 (0.88)

Примечание. КУ – ключевой участок; * – фоновое содержание в земной коре (Krauskopf, Bird, 1995; Hasan et al., 2013). Здесь и в табл. 4 приведены средние со стандартной ошибкой, в скобках указан размах варьирования; H – критерий Краскела–Уоллиса; p – уровень значимости; н.д. – нет данных.

Note. КУ – key area; * – background content in the Earth's crust (Krauskopf, Bird, 1995; Hasan et al., 2013). Here and in Table 4, the means with a standard error are specified, with a range of variation in brackets; H – the Kraskel–Wallis criterion; p – significance level; н.д. – no data.

Таблица 4. Содержание металлов (мг/кг) в доминирующих видах растений
Table 4. Content of metals (mg/kg) in dominant plant species

Металл Metal	Нормальное (токсическое)* Normal (toxic)	<i>Caroxylon dendroides</i> (Pall.) Tzvelev	<i>Suaeda micro-</i> <i>phylla</i> Pall.	<i>Caroxylon nodu-</i> <i>losum</i> Moq.	H (p)
Al	н.д.	2205 ± 217 (1970–2640)	747 ± 79 (613–953)	3145 ± 157 (2990–3300)	7.03 (0.03)
Fe	н.д.	1864 ± 163 (1660–2185)	655 ± 82 (455–830)	2565 ± 5 (2560–2570)	7.02 (0.03)
Mn	20–300 (300–500)	90 ± 10 (73–108)	55 ± 5 (45–67)	126 ± 17 (109–142)	7.01 (0.03)
Zn	27–150 (100–400)	44.9 ± 9.3 (35.0–63.5)	32.5 ± 8.1 (18.6–56.0)	46.6 ± 6.5 (40.1–53.1)	2.20 (0.33)
Cu	5–30 (20–100)	14.1 ± 1.0 (12.4–15.8)	10.4 ± 1.5 (8.6–14.9)	19.4 ± 2.9 (16.5–22.4)	5.44 (0.07)
Cr	0.1–0.5 (5–30)	9.1 ± 1.0 (7.5–10.9)	5.5 ± 0.9 (3.7–7.3)	10.7 ± 1.1 (9.6–11.9)	6.44 (0.04)
Ni	0.1–5 (10–100)	4.5 ± 0.6 (3.5–5.6)	3.0 ± 0.2 (2.7–3.6)	6.3 ± 0.2 (6.1–6.5)	6.20 (0.045)
Pb	5–10 (30–300)	1.9 ± 0.4 (1.1–2.4)	1.0 ± 0.2 (0.5–1.3)	2.2 ± 0.2 (2.0–2.5)	4.20 (0.12)
Cd	0.05–0.2 (5–30)	0.61 ± 0.06 (0.50–0.70)	0.60 ± 0.10 (0.36–0.75)	0.75 ± 0.13 (0.62–0.87)	0.78 (0.68)
Co	0.02–1.0 (15–30)	0.37 ± 0.07 (0.25–0.50)	0.20 ± 0.06 (0.10–0.36)	0.56 ± 0.06 (0.50–0.62)	5.14 (0.08)

Примечание. * – Нормальное содержание элемента в растениях, в скобках указано избыточное или токсическое содержание (Kabata-Pendias, Pendias, 2001); H – критерий Краскела–Уоллиса; p – уровень значимости; н.д. – нет данных.

Note. * – Normal content of the element in plants, with excess or toxic content specified in brackets (Kabata-Pendias, Pendias, 2001); H – the Kraskel–Wallis criterion; p – significance level; н.д. – no data.

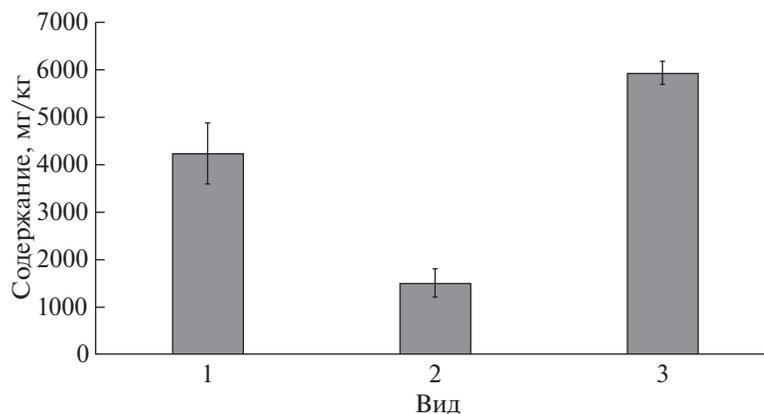


Рис. 4. Суммарное содержание (мг/кг) исследуемых металлов в доминирующих видах растений грязевого вулкана Алят.

1 – *Caroxylon dendroides* (Pall.) Tzvelev; 2 – *Suaeda microphylla* Pall.; 3 – *Caroxylon nodulosum* Moq.

Fig. 4. Total content of the studied metals (mg/kg) in dominant plant species of the mud volcano Alat.

1 – *Caroxylon dendroides* (Pall.) Tzvelev; 2 – *Suaeda microphylla* Pall.; 3 – *Caroxylon nodulosum* Moq.

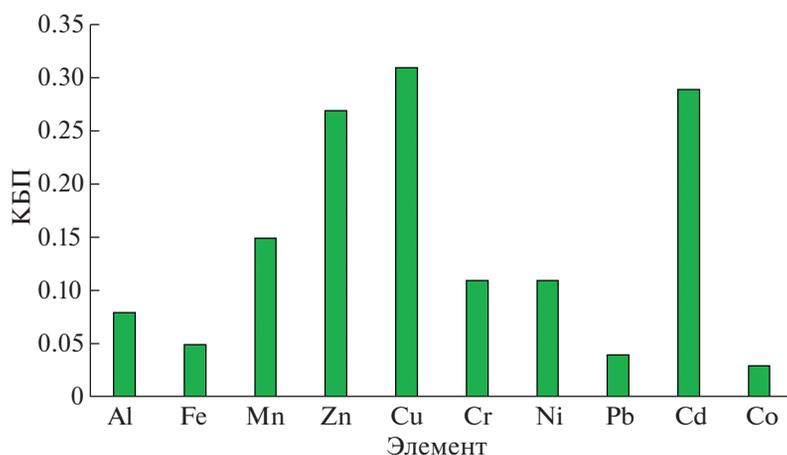


Рис. 5. Средние коэффициенты биологического поглощения доминирующих видов растений грязевого вулкана Алят.

Fig. 5. Average coefficients of biological absorption of the dominant plant species of the mud volcano Alat.

натрия в образцах вулканической грязи превышает 2% (Abduev, 2003; Gadgiyeva et al., 2021).

Выделенные нами доминирующие виды грязевого вулкана Алят – *Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum*, относятся к эугалофитам, накапливающим NaCl в надземных частях растений.

Интересно было провести сопоставление полученных нами данных о содержании ряда металлов в поверхностном слое почв с химическим составом образцов вулканической грязи вулкана Алят (Gadgiyeva et al., 2021). Сравнительный анализ выявил как совпадение, так и различия в содержании ряда элементов. Валовое содержание Fe, Mn, Co в поверхностном слое почв

ключевых участков сопоставимо с их содержанием в вулканической грязи. Концентрации Ni, Cu, Cr в 2–5 раз меньше, а Zn в 1.5 раза больше соответствующих значений в образцах вулканической грязи. Максимальные различия отмечены для Pb и Al: в вулканической грязи содержится в 6 раз больше алюминия и в 10 раз меньше свинца по отношению к исследованным нами почвам. Отсутствие достоверных различий в содержании всех исследуемых металлов в почвах ключевых участков и сопоставимые с литературными данными концентрации ряда металлов свидетельствуют о сходстве химического состава вулканической грязи и формируемых на ее основе почв, а различия могут быть обусловлены разными методами химического анализа. Рентгено-флуорес-

центный метод позволяет определять содержание большого числа химических элементов, включая редкоземельные и лантаноиды, но он обладает меньшей точностью измерения содержания ряда элементов по сравнению с методом эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Хорошо известно, что для нормальной жизнедеятельности растениям помимо основных и макроэлементов (С, N, S, P, Ca, Mg, K) необходимы различные микроэлементы (Fe, Mn, Cu, Mo, Zn и др.), которые в зависимости от концентрации могут рассматриваться и как токсичные тяжелые металлы (Kuznetsov, Dmitrieva, 2011). Современная классификация микроэлементов разделяет по их значимости для живых организмов на следующие группы: 1) жизненно необходимые – Fe, Mn, I, Cu, Zn, Co, Cr, Mo, Se; 2) условно необходимые – Li, B, Ni, V, Si, F, Br, Ti; 3) токсичные – Be, Al, Cd, Pb, Hg, Ba, Tl, Bi и др. (Rebrov, Gromova, 2008). Повышенные концентрации микроэлементов, превышающие необходимое для жизнедеятельности растений количество, оказывают токсическое действие, приводят к ингибированию роста, хлорозам и некрозам листьев, карликовости растений. Доминирующие виды грязевого вулкана Алят накапливают в своей наземной части незначительные концентрации металлов, содержание практически всех элементов не превышает нормального их содержания в растениях (табл. 4). Исследуемые виды *Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla* обогащены хромом и кадмием, содержание которых избыточно или токсично для растений. Поглощение и накопление металлов наземными частями исследуемых видов растений обусловлены видовой принадлежностью растений, т.к. достоверные различия в содержании всех исследованных металлов в образцах почвы ключевых участков и в корнеобитаемом слое почвы в местах произрастания доминирующих видов растений отсутствуют. По суммарному содержанию металлов виды можно расположить в убывающем порядке: *Caroxylon nodulosum* > *Caroxylon dendroides* > *Suaeda microphylla*.

Согласно существующей в настоящее время классификации, все растения можно подразделить на три группы: 1) аккумуляторы, накапливающие металлы в основном в наземных органах, как при высоких, так и при низких концентрациях металлов в почве; 2) индикаторы, концентрация металлов в которых отражает уровень их содержания в окружающей среде; 3) исключения, у которых поступление металлов в наземную часть ограничено, несмотря на их высокую концентрацию в среде и накопление в корнях (Seregin, Kozhevnikova, 2006). Оценка поглощения исследуемого набора металлов из поверхностного слоя почвы наземными частями доми-

нирующих видов растений грязевого вулкана Алят выявила незначительную степень миграции всех элементов. Коэффициенты биологического поглощения всех исследованных металлов в наземных частях *Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum* не превышают 0.3, что позволяет отнести эти виды растений к исключениям. Можно предположить, что, несмотря на высокую степень засоленности почвы, функция корневого барьера у исследуемых видов растений не нарушена, и в наземные части поступает лишь небольшое количество тяжелых металлов, которые не оказывают токсического воздействия на солеустойчивые виды растений. Следует подчеркнуть, что наименьшие величины коэффициентов биологического поглощения практически для всех исследованных металлов зарегистрированы у *Suaeda microphylla*, что также подтверждает специфичность в накоплении элементов доминирующими видами растений.

Таким образом, можно заключить, что смена доминирующих видов растений вниз по склону грязевого вулкана Алят не связана ни с химическим составом почвы, ни с уровнем поглощения тяжелых металлов наземными частями солеустойчивых растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования разнообразия растительных сообществ, встречающихся на территории грязевого вулкана Алят (Азербайджан), и миграции тяжелых металлов в системе почва–доминирующие виды растений позволяют сделать следующее заключение.

Вследствие высокой степени засоления почв в окрестностях грязевого вулкана Алят видовой состав растений отличается низкой степенью разнообразия (обычно присутствует 16–25 видов), а растения относятся к типичным галофитам. Основными сообществами на прилегающей к вулкану территории являются однолетнесолянковые с доминированием *Suaeda acuminata*, *Suaeda altissima* и полукустарничковые (*Suaeda microphylla*, *Caroxylon dendroides*, *C. nodulosum*, *Frankenia hirsuta*) солянковые с синузией злаков (*Bromus japonicus*, *Eremoperum orientale*, *Aeluropus litoralis*) и разнотравья (*Spergularia diandra*, *Plantago notata*, *Psylliostachys spicata*). Видовой состав растений (11 видов) на территории вулкана обеднен в сравнении с окружающей ценофлорой, общее проективное покрытие в растительных сообществах не превышает 25%. Основными растительными группировками вулкана являются *Halocnemum strobilaceum* + *Caroxylon dendroides* (верхняя часть склона, 181 м над ур. моря), *Halocnemum strobilaceum* + *Kalidium caspicum* (средняя часть склона, 107–121 м над ур. моря), *Caroxylon nodulosum* + *Bromus japonicus* + *Herbosa* (нижняя часть скло-

на, 78–95 м над ур. моря), у подножия вулкана в депрессии – *Suaeda microphylla* + *Bromus japonicus* + *Herbosa* и *Caroxylon nodulosum* + *Bromus japonicus* + *Herbosa*. С подъемом от основания к кратеру вулкана наблюдаются смена доминантов и изменение фитоценотической роли присутствующих видов.

Сравнительный анализ содержания Fe, Al, Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Cd в поверхностном слое почвы (0–20 см) не выявил достоверных различий их концентраций между ключевыми участками и их содержанием в ризосфере доминирующих видов растений, что свидетельствует о гомогенности химического состава почвы на всей территории вулкана. Концентрации большинства металлов не превышают их регионального фонового содержания, за исключением Zn и Cd.

Доминирующие виды растений характеризуются специфичностью в поглощении исследованных металлов и отличаются слабой миграцией элементов из почвы в растение. По суммарному содержанию Fe, Al, Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Cd в растениях исследуемые виды можно расположить в убывающем порядке: *Caroxylon nodulosum* > *Caroxylon dendroides* > *Suaeda microphylla*. Коэффициенты биологического поглощения всех исследованных металлов в надземных частях *Caroxylon dendroides*, *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum* не превышают 0.3, что свидетельствует о нормальном функционировании корневого барьера, препятствующего транслокации тяжелых металлов из почвы в надземные органы, и позволяет отнести эти виды растений к типичным исключателям.

На основе проведенных исследований можно констатировать, что от вершины грязевого вулкана Алят к его подножию смена доминантов и изменение фитоценотической роли присутствующих видов не связаны ни с химическим составом почвы, ни с уровнем поглощения тяжелых металлов надземными частями солеустойчивых растений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность научно-исследовательскому центру Института им. Р.Т. Эрдогана (г. Ризе) за оказанную помощь при проведении химических анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Abduev] Абдуев М.Р. 2003. Почвы с делювиальной формой засоления и вопросы их мелиорации. Баку. 93 с.
- [Akhmedov] Ахмедов А.Г. 1985. Грязевые вулканы и окружающая среда. Баку. 50 с.
- Aliyev Ad.A., Guliyayev I.S., Dadashov F.H., Rahmannov R.R. 2015. Atlas of world mud volcanoes. Baku. 321 p.
- [Berezina] Березина Н.А. 2009. Экология растений. М. 400 с.
- Braun-Blanquet J. 1964. Pflanzensoziologie. Wien–New York. 3A. 830 p.
- [Budagov] Будагов Б.А. 1988. Современные естественные ландшафты Азербайджанской ССР. Баку. 80 с.
- [Gadgiyeva et al.] Гаджиева С.Р., Алиева Т.И., Шахназарова Н.М. 2021. Определение элементного состава извержений грязевого вулкана Алят. – В кн.: Материалы Междун. науч. экологической конф., посвященной Году науки и технологий. Краснодар. С. 474–475.
- [Genkel] Генкель П.А. 1982. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М. 280 с.
- Hasan B.A., Kabir S., Selim R.A.H.M., Zaman M.N., Ah-san A., Rashid M. 2013. Enrichment factor and geo-accumulation index of trace metals in sediments of the ship breaking area of Sitakund Upazilla (Bhatiyar–Kumira), Chittagong, Bangladesh. – Journal of Geochemical Exploration. 125: 130–137.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 2001. Trace elements in soil and plants. London. 413 p.
- [Kerimova] Керимова Э.Д. 2010. Современное антропогенное воздействие на геосистемы грязевых вулканов и окружающих территорий. – Антропогенная трансформация природной среды. 1: 359–364.
- [Kholodov] Холодов В.Н. 2012. Грязевые вулканы: распространение и генезис. – Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 4: 5–27.
- [Koranina] Копанина А.В. 2019. Растительность Южно-Сахалинского грязевого вулкана как индикатор активности. – В кн.: Тезисы докл. III Всеросс. научн. конф. с международ. участием “Геодинамические процессы и природные катастрофы”. Южно-Сахалинск. С. 162.
- Krauskopf K.B., Bird D.K. 1995. Introduction to Geochemistry. 3rd ed. New York. 647 p.
- [Kuznetsov, Dmitrieva] Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. 2011. Физиология растений. М. 783 с.
- Mamedov G.Sh., Khalilov M.Y., Mamedova S.Z. 2010. Climate. – In: Ecological Atlas. Baku. P. 20–29.
- [Perel'man] Перельман А.И. 1989. Геохимия. М. 419 с.
- [Rebrov, Gromova] Ребров В.Г., Громова О.А. 2008. Витамины, макро- и микроэлементы. М. 960 с.
- Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Bogdanova E.S. 2017. Structural and physiological, and biochemical aspects of salinity tolerance of halophytes. – Plant Physiology. 64(4): 4641–477.
<https://doi.org/10.1134/S1021443717040112>
- Seregin I.V., Kozhevnikova A.D. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effect on higher plants. – Plant Physiology. 53(2): 257–277.
<https://doi.org/10.1134/S1021443706020178>
- World Checklist of Vascular Plants.
<http://wcvp.science.kew.org/>

CONTENT OF HEAVY METALS IN THE SOIL–PLANT SYSTEM ON THE ALAT MUD VOLCANO (AZERBAIJAN)

Sh. G. Isayeva^{a,#}, I. V. Lyanguzova^{b,##}, Sh. N. Gasimov^a, and R. T. Abdiyeva^a

^a Institute of Botany, Azerbaijan National Academy of Sciences
Badamdar, 40, Baku, AZ1004, Azerbaijan

^b V. L. Komarov Botanical Institute of RAS
Prof. Popov Str., 2, Saint Petersburg, 197376, Russia

[#]e-mail: s.isayeva@botany.science.az

^{##}e-mail: ilyanguzova@binran.ru

The paper presents the results of studying the diversity of plant communities found on the territory of the Alat mud volcano (40°05'2.85" N, 49°1'99.42" E, Azerbaijan), as well as an assessment of the migration of heavy metals in the system of the soil – dominant plant species. In key areas from the top of the volcano to its base, a geobotanical description was carried out using the Brown-Blangued method, dominant plant species and soil samples were selected, including those in the root layer of the soil. The content of Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Al, Ni, Pb, and Zn was determined by inductively coupled plasma emission spectroscopy in soil and plant samples. It has been established that the flora and vegetation of the volcano, in comparison with the surrounding cenoflora, is characterized by a lower species richness (11 species) and taxonomic diversity; the total projective cover in plant communities does not exceed 25%. In the plant communities on the territory of the mud volcano, there are mainly salt-tolerant species belonging to typical halophytes. With an increase from the base to the crater of the volcano, a change in dominants and a change in the phytocenotic role of the species present are observed. In the surface layer of the soil (0–20 cm), the metal concentrations in the key areas are located in a decreasing series: Fe > Al > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Cd. Despite the high degree of salinization of the territory of the mud volcano, the concentrations of most metals do not exceed their average content of the Earth's crust, with the exception of Zn and Cd. The dominant plant species [*Caroxylon dendroides* (= *Salsola dendroides*), *Suaeda microphylla*, *Caroxylon nodulosum* (= *Salsola nodulosa*)] are characterized by species specificity in the absorption of the studied metals and are characterized by weak migration of elements from the soil into the plant; the coefficients of biological accumulation do not exceed 0.3, i.e. these species are typical exceptions.

Keywords: mud volcano, heavy metals, biological absorption coefficient, flora, plant groups, saltwort, ephemera

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the Research Center of the R.T. Erdogan Institute (Rize) for their assistance in carrying out chemical analyses.

REFERENCES

- Abduev M.R. 2003. Pochvy s deluvial'noy formoy zasoleniya i voprosy ikh melioratsii [Soils with deluvial form of salinization and issues of their melioration]. Baku. 93 p. (In Russ.).
- Akhmedov A.G. 1985. Gryazevye vulkany i okruzhayushchaya sreda [Mud volcanoes and the environment]. Baku. 50 p. (In Russ.).
- Aliyev Ad.A., Guliyayev I.S., Dadashov F.H., Rahmanov R.R. 2015. Atlas of world mud volcanoes. Baku. 321 p.
- Berezina N.A. 2009. Ekologiya rasteniy [Ecology of plants]. Moscow. 400 p. (In Russ.).
- Braun-Blangued J. 1964. Pflanzensoziologie. Wien–New York. 3A. 830 p.
- Budagov B.A. 1988. Sovremennye estestvennyye landschafty Azerbaidzhanskoy SSR [Modern natural landscapes of the Azerbaidzhan SSR. Baku. 80 p. (In Russ.).
- Gadgiyeva S.R., Aliyeva T.I., Shakhnazarova N.M. 2021. Opredeleniye elementnogo sostava izverzheniy gryazevego vulkana Alat [Determination of the elemental composition of the Alat mud volcano eruptions]. – In: Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi ekolocheskoi konferentsii, posvyashchennoi Godu nauki i tekhnologii. Krasnodar. P. 474–475 (In Russ.).
- Genkel P.A. 1982. Fiziologiya zharo- i zasukhoustoychivyykh rasteniy [Physiology of heat and drought resistance of plants]. Moscow. 280 p. (In Russ.).
- Hasan B.A., Kabir S., Selim R.A.H.M., Zaman M.N., Ahsan A., Rashid M. 2013. Enrichment factor and geoaccumulation index of trace metals in sediments of the ship breaking area of Sitakund Upazilla (Bhatiary–Kumira), Chittagong, Bangladesh. – Journal of Geochemical Exploration. 125: 130–137.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 2001. Trace elements in soil and plants. London. 413 p.
- Kerimova E.D. 2010. Sovremennoye antropogennoye vozdeystvie na geosistemy gryazevykh vulkanov i okruzhayushchikh territoriy [Modern anthropogenic impact on the geosystems of mud volcanoes and surrounding areas]. – Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy. 1: 359–364 (In Russ.).
- Kholodov V.N. 2012. Gryazevye vulkany: rasprostraneniye i genezis [Mud volcanoes: distribution and genesis]. –

- Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana. 4: 5–27 (In Russ.).
- Kopanina A.V. 2019. Rastitel'nost' Yuzhno-Sakhalinskogo gryazeвого vulkana kak indikator aktivnosti [Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano as an indicator of activity]. — In: Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyye katastrofy. Tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym echastiem. Yuzhno-Sakhalinsk. P. 162 (In Russ.).
- Krauskopf K.B., Bird D.K. 1995. Introduction to Geochemistry. 3rd ed. New York. 647 p.
- Kuznetsov V.V., Dmitriyeva G.A. 2011. Fiziologiya rasteniy [Plant Physiology]. Moscow. 783 p. (In Russ.).
- Mamedov G.Sh., Khalilov M.Y., Mamedova S.Z. 2010. Climate. — In: Ecological Atlas. Baku. P. 20–29.
- Perel'man A.I. 1989. Geokhimiya [Geochemistry]. Moscow. 419 p. (In Russ.).
- Rebrov V.G., Gromova O.A. 2008. Vitaminy, makro- i mikroelenty [Vitamins, macro- and microelements]. Moscow. 960 p. (In Russ.).
- Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Bogdanova E.S. 2017. Structural and physiological, and biochemical aspects of salinity tolerance of halophytes. — Plant Physiology. 64(4): 4641–477.
<https://doi.org/10.1134/S1021443717040112>
- Seregin I.V., Kozhevnikova A.D. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effect on higher plants. — Plant Physiology. 53 (2): 257–277.
<https://doi.org/10.1134/S1021443706020178>
- World Checklist of Vascular Plants.
<http://wcvp.science.kew.org/>