

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.42;550.47

ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ о. ШИКОТАН
(КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2022 г. М. Г. Опекунова^а *, А. Ю. Опекунов^а, В. В. Сомов^а, С. Ю. Кукушкин^а,
И. Ю. Арестова^а, С. А. Лисенков^а, А. Р. Никулина^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет,
10-я линия ВО, 33/35, Санкт-Петербург, 199178 Россия

*e-mail: m.opekunova@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Изучен химический состав почв *Narlic Andosols* о. Шикотан (Малая Курильская гряда), сформированных на вулканогенных породах разного состава и возраста. На основе масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с полным кислотным разложением проб установлено фоновое содержание металлов (Ba, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Cr, Fe, V, Sc, K, Sr, Na, Ca, Mo) в почвах. Показано, что валовое содержание химических элементов отличается значительной контрастностью и зависит от состава почвообразующих пород, зонально-азональной ландшафтно-геохимической дифференциации, влияния океанических воздушных масс и состава растительных сообществ. Почвам свойственен высокий естественный уровень содержания фемафильных элементов Sc, V, Fe, Cu, Zn, превышающий кларки. Концентрация K, Cr, Ni, Sr и Ba меньше кларка, содержание Ca, Mo, Cd и Pb сопоставимо с кларковыми значениями. Ведущим фактором, определяющим миграцию и аккумуляцию химических элементов в почве, являются кислотно-щелочные условия, которые регулируются соотношением почвообразующих пород основного и среднего составов. В условиях гумидного климата и расчлененного рельефа механизмом латеральной миграции выступает не только солевой, но и механический сток металлов, приводящий к дифференциации в катене литофильных и сидерофильных элементов. Cr, Co, Ni закрепляются в гумусовых горизонтах подчиненных ландшафтов, Cd и Pb тяготеют к поверхностным горизонтам автономных фаций. При статистической обработке данных использованы корреляционный и кластерный анализы, метод главных компонент факторного анализа (Statistica 12.0). На основе статистического анализа получены и обоснованы результаты, свидетельствующие о локальном химическом загрязнении почв в пределах с. Крабовозовское и на отдельных участках острова, затронутых познавательным туризмом. Основным источником загрязнения служит автомобильный транспорт.

Ключевые слова: региональный геохимический фон, латеральная миграция, антропогенное загрязнение

DOI: 10.31857/S0032180X22100343

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется развитию Курильских островов, укреплению экономики и созданию новых рабочих мест в регионе. Согласно «Стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 г.», Курильские острова отнесены к территории опережающего социально-экономического развития. Однако они относятся к малоизученным районам в плане оценки ландшафтно-геохимической обстановки и степени антропогенного нарушения территории. Наряду с природными опасностями (сейсмической и вулканической активностью, цунами), промышленное развитие

может привести к росту техногенных нагрузок на ландшафты. Поэтому рациональное природопользование должно базироваться на научно выверенной оценке экологической устойчивости природно-территориальных комплексов (ПТК) островов и экологических рисков природного и техногенного происхождения. В связи с низкой степенью изученности ландшафтов Курильских островов большое внимание уделяется процессам геохимической дифференциации и оценке природного фона содержания химических элементов в почвах. Наряду с установленными ПДК и ОДК [27], важным критерием оценки возможной трансформации химического состава почв под

влиянием антропогенного воздействия, особенно в условиях сложного геологического строения, служит региональный геохимический фон. Определению фоновых содержаний металлов в почвах посвящены крупные международные и национальные проекты (Barents Region, GEMAS, DEQ, Envirolink, NGSА и др.), отечественные [10, 11, 14, 18, 20] и зарубежные исследования [32–37, 40–42]. Данные по химическому составу почв Курильских островов и сопряженных регионов либо малочисленны [9, 13, 23, 30], либо анализы были проведены с помощью приближенно-количественного эмиссионного спектрального анализа [5] и требуют уточнения современными методами. В настоящее время опубликованы материалы, характеризующие особенности почвенного покрова островов Кунашир и Итуруп, имеются единичные публикации по его кислотно-щелочным свойствам и содержанию ряда микроэлементов [7, 8, 23, 30], а информация о химическом составе почв о. Шикотан отсутствует. В этих условиях особое значение приобретает получение новых данных и установление закономерностей формирования химического состава почв, а также влияния природных и антропогенных факторов.

Цель работы – определение закономерностей распределения металлов в почвах о. Шикотан, установление регионального геохимического фона для использования в системе государственного и производственного экологического мониторинга. Задачи исследования:

- 1) определить основные ландшафтно-геохимические условия формирования почв о. Шикотан;
- 2) выявить роль природных факторов в формировании химического состава почв;
- 3) определить закономерности радиальной и латеральной миграции химических элементов в структуре почвенно-геохимических катен;
- 4) оценить изменения химического состава почв под влиянием антропогенной нагрузки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследований. Шикотан является самым крупным островом в составе Малой Курильской гряды площадью 260 км² (рис. 1). Протяженность с северо-востока на юго-запад составляет 28 км, средняя ширина – 10 км. Шикотан характеризуется сложным геологическим строением. Он сложен вулканическими и вулканогенно-осадочными образованиями основного и среднего состава позднемелового и палеогенового возраста. По представлению В.К. Гаврилова и Н.А. Соловьевой (1973) с дополнениями Ю.И. Говорова и Б.Н. Пискунова (2004) они делятся на три основных комплекса: матакотанский и шикотанский вулканогенно-молассовые и вулканический Томари-Ноторо. В составе матакотанского ком-

плекса в западной части острова установлены вулканические и вулканогенные брекчии, переходящие в верхней части в конгломераты. Комплекс сложен базальтовыми, андезитобазальтовыми лавами, лавобрекчиями, агломератовыми туфами, грубо- и мелкообломочными вулканогенно-осадочными породами. Для них характерно повышенное содержание общего Fe, MnO и CaO, пониженные концентрации MgO и SiO₂ (табл. 1). В пределах матакотанского комплекса выделяется крабозаводская свита, которая слагает береговые обрывы бухты Крабовая и представлена базальтами с шаровой и подушечной отдельностью [15].

Шикотанский комплекс распространен преимущественно на востоке острова. Сложен эффузивно-пирокластическими образованиями: базальтами и андезибазальтами, которые сочетаются с прослоями массивных базальтов и линз конгломерато-брекчий. По химическому составу они относятся к породам с нормальной щелочностью с низким содержанием TiO₂ и CaO, пониженной концентрацией оксидов Fe и повышенным содержанием MgO. Комплекс осложнен дайками габброидов (шикотанский комплекс габброидов) и долеритами и базальтами (дмитровский дайковый комплекс) в северной и южной частях острова [15, 28].

Комплекс Томари-Ноторо в центральной части острова сложен лавами и лавобрекчиями базальтов, андезибазальтов и андезитов. Характерным является присутствие субщелочных калиевых пород абсарокит-шошонитовой серии более кислого состава (малокурильский комплекс по [15]). В целом породы комплекса пересыщены кремнеземом с высоким содержанием CaO, Al₂O₃, умеренным TiO₂, MgO и щелочей при значительном преобладании Na.

Рельеф острова представлен аккумулятивно-денудационными и тектоническими формами в виде сильнорасчлененных возвышенных плато и столовых гор андезитового и базальтового, реже туфового состава [1].

Шикотан расположен в умеренно морском муссонном климате с сильными и продолжительными ветрами, большим количеством атмосферных осадков, частыми туманами. Характерны мягкая зима, затяжная дождливая весна, мало-солнечное, лишенное сильной жары лето и относительно сухая осень [12, 17, 24].

Остров входит в состав Южно-Курильской ботанико-географической провинции Южносахалинско-Южнокурильско-Хоккайдской подобласти Дальневосточной хвойно-широколиственной области. Лесные массивы представлены елово-пихтовыми сообществами с елью аянской *Picea ajanensis* (Lindl. & Cord.) Fisch. ex Carr. и пихтой сахалинской *Abies sachalinensis* Fr. Schmidt, а так-

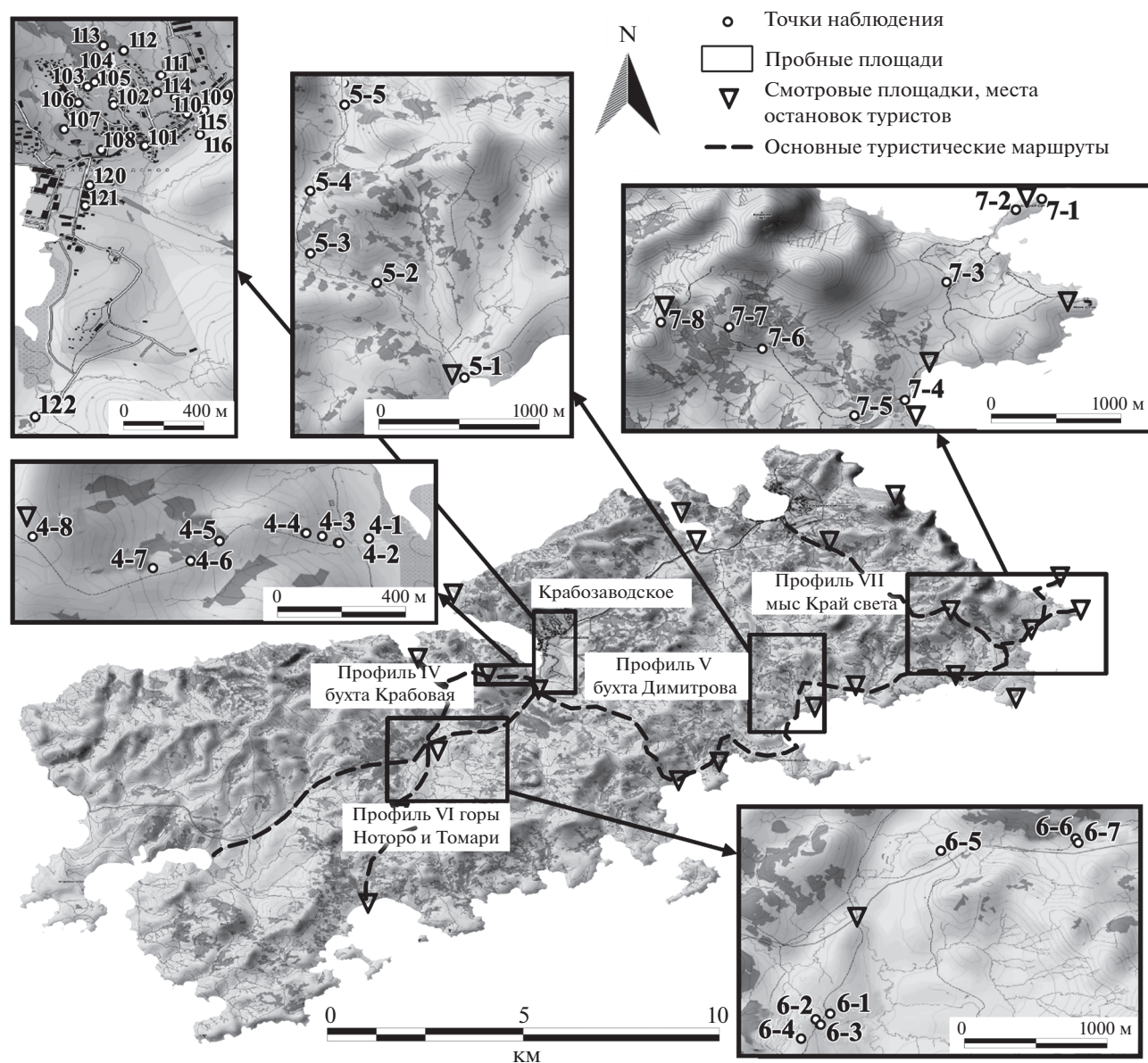


Рис. 1. Картограмма расположения пробных участков на о. Шикотан, Малая Курильская гряда.

же рощами из каменной березы *Betula ermanii* Cham. с белоберезниками *Betula platyphylla* Sukacz. и зарослями низкорослого (около 50–70 см) курильского бамбука *Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata [3]. Здесь произрастают ель аянская, бархат сахалинский *Phellodendron sachalinense* (F. Schmidt) Sarg., лиственница курильская *Larix kurilensis* Mayr., рябина *Sorbus commixta* Hedl., тис *Taxus cuspidata* Siebold et Zucc. и др. [1, 26].

В соответствии с почвенным районированием о. Шикотан относится к Южно-Курильскому округу [16]. Почвы, сформировавшиеся на вулканических отложениях, по классификации почв России 2004 г. относятся к типу слоисто-охристых [31] (по WRB *Haplic Andosols* [38]). Для таких

почв характерен особый минералогический состав с преобладанием легковыветривающихся минералов и обилием аморфных минеральных фаз типа аллофана и органо-минеральных соединений. Специфические водно-физические свойства: высокая внутри- и межагрегатная пористость, провальная фильтрация и одновременно высокая водоудерживающая способность [31].

Несмотря на отсутствие современного вулканизма, на острове в почвообразовательных процессах активное участие принимает пепловый материал, поступающий при извержении вулканов близрасположенных островов. Таким образом, в результате совместного проявления зональных и синлитогенных почвообразовательных

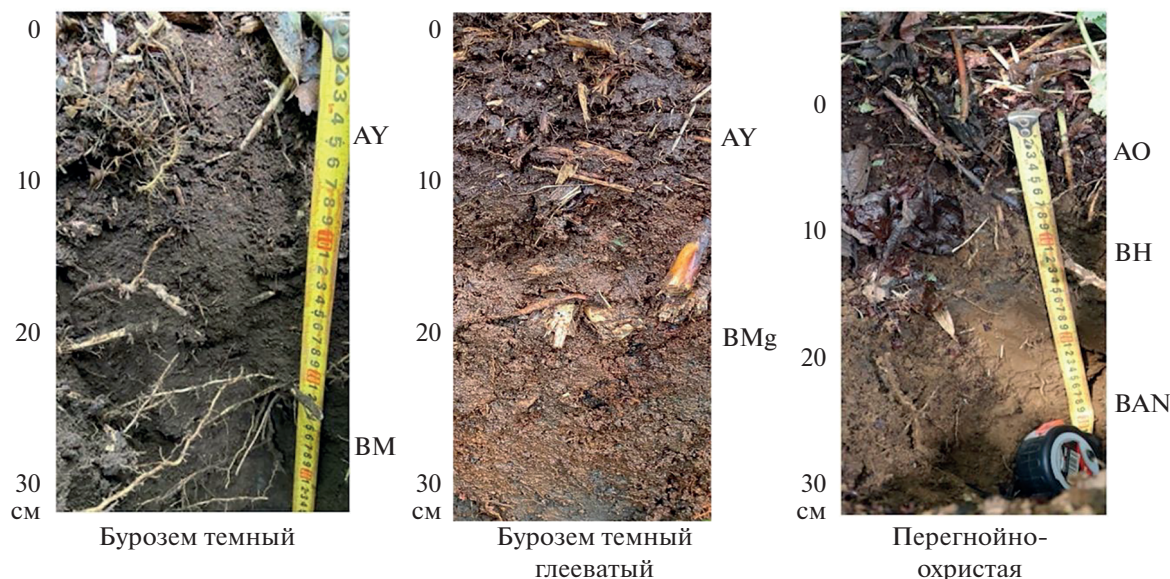


Рис. 2. Почвы о. Шикотан.

процессов формируются почвы со сложным морфологическим строением профиля, для которого характерна слоистость и полигенетичность, наличие погребенных горизонтов, высокое содержание органического вещества по всему профилю. Согласно Атласу Курильских островов [1], на о. Шикотан преобладают буроземы темные глееватые (27.7% площади острова) и дерновые (серогумусовые) почвы (24.2%). Существенную площадь занимают буроземы грубогумусированные [16] (рис. 2).

Сложное геологическое строение, контрастный рельеф и разнообразие растительности способствуют фрагментации почвенного покрова, частой смене почвенных разностей. Кроме того, определенное влияние на химический состав почв оказывает поступление тонкой тefры при извержении вулканов Большой и Малой Курильской гряды, Камчатки и Японских островов. Так, на примере торфяника в среднем течении р. Горобец показано возникновение прослоек пепла, связанных с извержением в разные годы вулканов

Таблица 1. Содержание породообразующих элементов в вулканических комплексах Малой Курильской гряды [22], мас. %

Оксид	Комплекс		
	матакотанский	шикотанский	Томари-Ноторо
SiO ₂	49.16	51.63	52.72
TiO ₂	0.82	0.65	0.80
Al ₂ O ₃	17.75	16.77	17.23
Fe ₂ O ₃	6.04	4.98	4.78
FeO	4.14	3.45	3.9
MnO	0.19	0.16	0.16
MgO	4.88	5.86	5.83
CaO	8.80	7.87	8.14
Na ₂ O	3.36	3.45	3.43
K ₂ O	1.18	1.28	1.12
P ₂ O ₅	0.19	0.14	0.009
H ₂ O	0.42	1.38	0.37
Сумма	98.42	98.28	98.73
Количество проб	106	50	46

Комагатаке, Тарумаи, Масю на о. Хоккайдо, вулкана Львиная пасть на о. Итуруп и др. [25].

Материалы и методы. В августе 2021 г. на острове проведены комплексные ландшафтно-геохимические исследования. Изучены фоновые площадки, расположенные на 4 профилях в различных частях острова в пределах основных геологических комплексов, и антропогенно модифицированные ПТК в пределах с. Крабозаводское. Всего обследовано 45 пробных площадок (пикетов – ПК) в различных ПТК с максимальным охватом их природного разнообразия в различных геохимических позициях (рис. 1, 3).

Профиль 4 (ПР4) заложен на склоне северной экспозиции горы Горобец к бухте Крабовая и включает 8 ПК. Длина его составляет 1100 м, перепад высот – 203 м. Почвы – буроземы темные в нижней и средней частях, лугово-дерновые в верхней части склона – формируются на делювии туфоконгломератов и вулканомиктитов основного состава (базальты) крабозаводской свиты.

Профиль от бухты Димитрова по склону западной экспозиции (ПР5) к вершине состоит из 5 ПК, имеет длину 1100 м и перепад высот 97 м. Условно профиль можно разделить на два участка. В нижней его части почвообразование идет на делювии пород основного состава (димитровский дайковый комплекс долеритов и базальтов [15]), а в верхней части – на субвулканических образованиях малокурульского комплекса более кислого состава. Почвы представлены буроземами грубогумусированными, буроземами темными, буроземами темными глееватыми и подбурами.

Профиль 6 (ПР6) частично заложен на породах вулканического комплекса Томари-Ноторо и дальше проходит по вулканогенно-осадочным породам малокурульского комплекса. Состоит из 6 ПК и имеет длину более 3500 м с перепадом высот 19 м. Профиль пересекает ступенчато-аккумулятивную морскую равнину, соединяя возвышенные краевые участки центрального плато. Почвы представлены буроземами темными, подбурами и лугово-дерновыми почвами, формирующимися на толще, сложенной лавами и лавобрекчиями андезитов и андезибазальтов.

Изучение пространственной дифференциации почв в северо-восточной части о. Шикотан проведено по профилю 7 (ПР7), проходящему от м. Край Света к бухте Маячная и от уреза воды Тихого океана по склону западной экспозиции к вершине перевала. Длина его составляет 4800 м, перепад высот 128 м. Почвы представлены буроземами грубогумусированными, буроземами темными, дерновыми серогумусовыми почвами, петроземами грубогумусовыми и приурочены к породам шикотанского комплекса.

В черте с. Крабозаводское заложено 19 ПК, которые распределены равномерно по площади жилой застройки.

На каждом пикете дана детальная физико-географическая характеристика ПТК, включающая описание почв (по прикопкам на глубину залегания срединного горизонта) и растительности (ярусность, синузильность, видовой состав, проективное покрытие растений, их обилие по Друде, фенологическое состояние, жизнеспособность и др.). Кроме того, особое внимание уделено потенциальным источникам антропогенного воздействия, их размещению на местности, возможному распространению загрязняющих веществ в катенарной структуре ПТК, оценке нарушения природной среды и др.

В комплекс исследований входил отбор проб почв из двух генетических горизонтов: поверхностного аккумулятивного (А) и срединного (ВF, ВHF, ВG). Отобрано и проанализировано 72 пробы почв, в том числе 19 проб на техногенно измененной территории. В почвах естественной влажности в полевых условиях определялась величина рН с помощью рН-метра (Horiba LAQUAtwin В-712) с горизонтальным электродом для измерения твердых, рассыпчатых, гелеобразных и жидких веществ.

Одной из задач исследований о. Шикотан являлась оценка загрязнения почв в связи с хозяйственной деятельностью и неорганизованным познавательным туризмом. С этой целью были отобраны поверхностные пробы почв в пределах с. Крабозаводское и на смотровых площадках туристических маршрутов. Кроме того, заложенные профили частично проходили через участки, используемые в качестве туристических маршрутов.

В Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского проводили полное кислотное разложение проб почв с определением металлов (Na, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Pb, Cd, Ni, Co, Cr, Ba, Sr и Cd) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ELAN-6100 DRC.

Результаты интерпретировали на основе сопоставления среднего содержания изученных металлов на урбанизированной территории (участок Крабозаводское) с природными показателями незатронутых хозяйственной деятельностью районов.

Фоновые концентрации тяжелых металлов в почвах рассчитывали с использованием минимально-аномальной концентрации элемента, по которой устанавливали аномальную концентрацию, обусловленную техногенными причинами или погрешностями при отборе и подготовке проб:

$$x_{\min.an} = \bar{x} \pm t\delta,$$

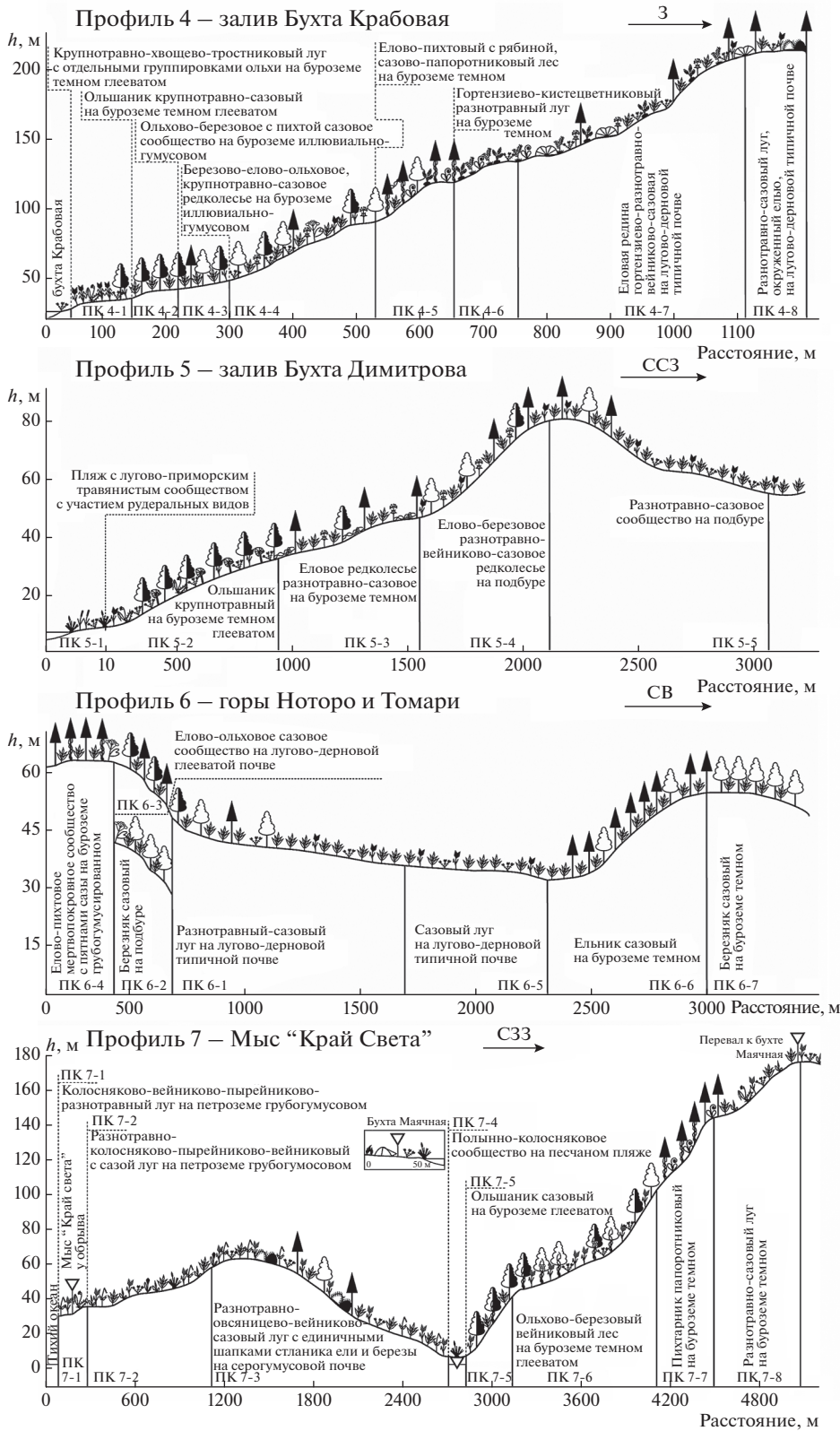


Рис. 3. Схемы профилей на о. Шикотан.

где \bar{x} – среднее содержание химического элемента, δ – стандартное отклонение; t – коэффициент Стьюдента (значения его табулированы в зависимости от уровня значимости и числа проб).

Величина коэффициента Стьюдента с доверительным интервалом 95% для исследуемых выборок ($n \geq 26$) составляет около 2.0. Таким образом, окончательно формула имеет следующий вид: $x_{\min.an} = \bar{x} \pm 2\delta$. Все значения, выходящие за указанные пределы, исключали из расчета регионального фона, который определяли по “очищенным” выборкам.

Математическую обработку результатов проводили с использованием описательной статистики в программе Excel. Для многомерного статистического анализа геохимических данных использовали кластерный анализ и метод главных компонент (ФА МГК) факторного анализа в программном пакете Statistica 12.0 (StatSoft). Кластерный анализ выполняли иерархическим агломеративным методом (tree clustering) по правилу одиночной связи (Single Linkage) с предварительной стандартизацией (Standartize) концентраций для двух выборок содержания химических элементов в гумусовых и срединных горизонтах. Метру сходства между элементами определяли как евклидово расстояние. ФА МГК проводили для трех статистических выборок с 17 переменными (содержания металлов) и для 72 образцов почвы.

Для оценки естественной геохимической неоднородности и интенсивности миграции химических элементов в почвенных катенах рассчитывали коэффициенты латеральной дифференциации (отношение содержания элемента в органогенном горизонте почвы подчиненного ландшафта к его содержанию в том же горизонте почв геохимически автономного ландшафта, L) [6]. В связи с высокой гетерогенностью состава пород при расчете учитывали геологическое строение территории. Это делалось на основе сравнения содержания элемента в срединных горизонтах тех же почв, так как на формирование их химического состава большое влияние оказывают почвообразующие породы. В этих горизонтах определяли отношение элементов, которое назвали коэффициентом гетерогенности геологического строения (КГГС):

$$\text{КГГС} = \frac{c_{i1}}{c_{i2}},$$

где c_{i1} и c_{i2} – содержание металла в срединных горизонтах соответственно верхнего и нижнего катенарных уровней, мг/кг.

Затем коэффициент латеральной миграции нормировали по этому коэффициенту путем деления L на коэффициент гетерогенности геологического строения. Такой подход позволил отчасти снять влияние состава почвообразующих по-

род на величину L . Однако необходимо иметь в виду, что его использование целесообразно в том случае, когда влияние почвообразовательных процессов на накопление и вынос рассматриваемых элементов, особенно их радиальная миграция, в сравниваемых ландшафтах однотипны.

Сравнительную оценку уровня загрязнения почв и обоснования выделенных факторов проводили на основе расчета суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) [27]. Исходя из сходства геологического строения территорий, в качестве нормативных значений, соответствующих фоновым содержаниям металлов для загрязненных участков, приняли средние содержание металлов в органогенном горизонте почв ПР4, а в центральной части острова – ПР6. Для снятия возможного влияния гетерогенности геологического строения расчет проводили только по металлам, которые на основе статистического анализа были отнесены к потенциальным поллютантам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотно-щелочные свойства почв. Почвы о. Шикотан характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией, величина рН варьирует в пределах 5.10–7.52. Это существенно влияет на изменение подвижности химических элементов в ландшафте. В нейтральной среде большинство химических элементов обладает низкой миграционной способностью, при подкислении почвенных растворов подвижность их резко увеличивается [19, 21, 39]. Основным фактором, определяющим изменение кислотно-щелочного показателя, служат почвообразующие породы. Наименьшие значения рН отмечены в почвах, формирующихся в центральной части острова на ПР6 (комплексы Томари-Ноторо и малокурильский), а также на породах шикотанского вулканогенно-молассового комплекса на ПР5 к бухте Димитрова и лавах и лавобрекчиях среднего состава в СЗЗ части ПР7. Нейтральную и слабощелочную реакцию имеют почвы, развивающиеся на базальтах склона горы Горобец, а также почвы на тектонитах пород основного состава на макросклоне в бухте Димитрова и на м. Край Света. При переходе от гумусового к срединному горизонту в большинстве почв внутренних районов острова наблюдается увеличение рН. В почвах морских террас, где существенно влияние океанических воздушных масс, отмечается повышение рН в органогенном горизонте.

Кроме того, в пределах развития одного геологического комплекса, изменение величины рН происходит при смене доминант растительных сообществ. Подкисление поверхностного горизонта установлено в почвах под елово-пихтовыми лесами за счет опада хвои, содержащей большое количество смоляных кислот.

Содержание и ассоциативность химических элементов в почвах. Анализ содержания химических элементов в почвах острова свидетельствует о гетерогенности выборок, обусловленных сложным геологическим строением территории. Содержание большинства металлов характеризуется значительным разбросом величин. На тесную связь химического состава почв и горных пород указывали другие исследователи Курильских островов [23]. Как отмечалось выше, в геологическом строении острова преобладают эффузивы основного и среднего состава. В табл. 2 приведено среднее содержание металлов в почвах изученных профилей, которое позволяет предположить, что основные породы в максимальной степени представлены в матакотанском (крабозаводская свита) и шикотанском вулканогенно-молассовых комплексах базальтоидов (ПР4, ПР5, ПР7). Породы комплекса Томари-Ноторо и малокурильского комплекса (ПР6) ближе к составу андезитов и более кислых пород (субщелочных калиевых разновидностей). Однако шикотанский комплекс в северо-восточной части острова в районе заложения ПР5 и ПР7 характеризуется значительной гетерогенностью, о чем свидетельствует широкий диапазон содержания металлов в срединном горизонте почв. Это обусловлено наложением комплекса даек габброидов, долеритов и базальтов.

Геохимическую структуру почв и ее связь с почвообразующими породами рассматривали на основе ФА МГК содержания металлов в срединном горизонте (табл. 3). В целом все вариации химизма изученных почв описываются тремя ассоциациями. Первый фактор включает около 50% изменчивости исходных признаков. Он отражает дифференциацию почв по типам почвообразующих пород. Ассоциация металлов-фельсифилов Mo–Pb–Cd (положительные значения фактора) обусловлена химизмом кислых пород, парагенезис металлов-сидерофилов и литофилов (отрицательные значения) ассоциируется с основными породами. Вторая компонента (вес 25%) отражает дифференциацию основных пород на фемафильную группу элементов (металлы основных и ультраосновных пород – Fe, V, Mg, Sc, Ni, Co и др.) и щелочные металлы. Считается [22], что все базальтоиды острова относятся к нормально щелочному ряду, однако их щелочность (сумма оксидов натрия и калия) различается, и максимум ее отмечается в породах шикотанского комплекса. К щелочному ряду тяготеют субщелочные породы малокурильского комплекса (ПР6).

Для выявления особенностей химического состава срединных горизонтов почв в катенарной структуре заложенных профилей, а также привязки к основным геологическим комплексам, пробы почв оценены по нагрузкам на главные факторы. В пределах матакотанского комплекса крабозаводской серии (ПР4) буроземы и подбуры характери-

зуются однородной геохимической структурой и тяготеют к основным породам фемафильного ряда (отрицательные значения I и II факторов). Почвы на ПР6, представленные буроземами темными, подбурами и лугово-дерновыми почвами, имеют максимальные нагрузки на ассоциацию эффузивов среднего состава (положительные нагрузки на I и II факторы). Участки заложения ПР5 и ПР7 в пределах шикотанского комплекса отличаются неоднородностью геологического строения. Часть проб ПР7 от м. Край Света (петроземы грубогумусовые и буроземы темные глееватые) и ПК 2 на ПР5 в бухте Димитрова (бурозем темный глееватый) характеризуется максимальными нагрузками на базальтоиды щелочного ряда (отрицательные значения I и положительные II факторов). По мере удаления от берега и повышения гипсометрических уровней, то есть при переходе от супераквальных пляжевых отложений к трансэлювиальным позициям с буроземами темными, оба профиля пересекают породы более кислого состава, близкие по химизму к породам малокурильского комплекса. Они представлены ассоциацией фельсифилов (положительные нагрузки на I фактор).

В целом факторный анализ содержания металлов в срединном горизонте позволяет говорить, что основным структурным элементом химического каркаса почв служит парагенезис фемафильных и щелочных металлов. Валовые содержания элементов этих групп характеризуются высокими значениями и существенно превосходят кларки почв. Металлы-халькофилы (Cu, Zn, Cd, Pb) в срединном горизонте не проявляют парагенетического сродства между собой, что можно связать с отсутствием сульфидных пород на участках исследований, а также низкой подвижностью и степенью вовлечения этих металлов в биогеохимический круговорот [19]. Это объясняется в основном нейтральными значениями pH почв и содержанием металлов на уровне кларка.

Структура связей металлов в органогенном горизонте почв, изученная на основе факторного анализа, отличается от срединного горизонта. Первый фактор, который объясняет 55% общей дисперсии выборки, отражает тренд накопления фемафильных металлов, доминирующих в составе основных эффузивов. Самостоятельная ассоциация фельсифилов в структуре фактора, как это выявлено в срединном горизонте, не представлена. Вторая компонента (17%) отвечает за процессы хелатообразования и представлена ассоциацией халькофилов (Cu, Cd, Pb, Zn) и железа. Эти металлы относятся к элементам-комплексобразователям и входят в состав органо-минеральных соединений, составляющих значительную долю почвенно-поглощающего комплекса. В срединном горизонте указанные металлы включены в структуру породной ассоциации в качестве эле-

Таблица 2. Содержание металлов (среднее \pm доверительный интервал на 5% уровне значимости) в изученных почвах о. Шикотан, мг/кг

Металл	Профиль/участок				
	4	5	6	7	Крабозаводское
Органогенный горизонт					
Na	9300 \pm 400	9300 \pm 4800	5800 \pm 1700	13400 \pm 2400	10900 \pm 1800
Mg	10300 \pm 750	9950 \pm 7100	5100 \pm 1650	14150 \pm 5050	13750 \pm 3300
K	5800 \pm 300	4900 \pm 2100	4200 \pm 1300	6500 \pm 1300	9400 \pm 1200
Ca	16100 \pm 2000	14700 \pm 8300	11100 \pm 4500	24000 \pm 8100	17900 \pm 2700
Sc	17 \pm 1.4	11.6 \pm 7.3	8.6 \pm 3.0	17.0 \pm 2.0	18.6 \pm 2.67
V	175 \pm 13	103 \pm 66	76.5 \pm 28	163 \pm 25	186 \pm 27
Cr	27 \pm 19	40.9 \pm 42	11.8 \pm 7.4	49.5 \pm 30	39 \pm 9.4
Fe	53500 \pm 3200	31600 \pm 19200	23800 \pm 8600	46500 \pm 5600	55700 \pm 5400
Co	16 \pm 1.6	11.4 \pm 7.9	7.79 \pm 2.6	16.1 \pm 4.7	20.8 \pm 3.2
Ni	10 \pm 1.5	20.7 \pm 22	6.94 \pm 3.0	17.8 \pm 9.0	23.5 \pm 4.6
Cu	54 \pm 7.5	43.8 \pm 29	30.4 \pm 6.4	65.2 \pm 24	100 \pm 17.6
Zn	100 \pm 10	71.2 \pm 23	73.2 \pm 22	80.9 \pm 10	162 \pm 36
Sr	118 \pm 11	148 \pm 81	95.3 \pm 29	251 \pm 110	229 \pm 36
Mo	1.56 \pm 0.10	1.17 \pm 0.55	1.04 \pm 0.19	1.42 \pm 0.36	1.40 \pm 0.27
Cd	0.32 \pm 0.05	0.23 \pm 0.05	0.31 \pm 0.09	0.26 \pm 0.07	0.33 \pm 0.06
Ba	216 \pm 21	210 \pm 142	167 \pm 52	278 \pm 71	583 \pm 124
Pb	16 \pm 2.6	17.2 \pm 5.0	19.0 \pm 3.5	17.3 \pm 4.0	147 \pm 242
pH	6.63 \pm 0.36	5.94 \pm 0.66	5.36 \pm 0.22	6.00 \pm 0.44	5.63 \pm 0.65
Срединный горизонт					
Na	7000 \pm 1100	11900 \pm 2600	10000 \pm 600	12800 \pm 2200	—
Mg	14950 \pm 2700	11100 \pm 5900	7650 \pm 1200	15350 \pm 6150	—
K	6500 \pm 1200	6000 \pm 1600	5900 \pm 1400	7200 \pm 2500	—
Ca	14700 \pm 1200	15200 \pm 2000	13800 \pm 2400	22100 \pm 7900	—
Sc	22.3 \pm 0.9	18.8 \pm 1.5	17.2 \pm 2.7	20.7 \pm 3.0	—
V	238 \pm 23	173 \pm 14	151 \pm 20	196 \pm 26	—
Cr	28.9 \pm 8.3	32.4 \pm 36	16.6 \pm 6.4	43.9 \pm 22	—
Fe	68300 \pm 4700	56700 \pm 4300	49500 \pm 5200	58400 \pm 4300	—
Co	25.5 \pm 3.5	15.8 \pm 5.3	14.4 \pm 1.5	19.7 \pm 3.5	—
Ni	18.0 \pm 4.8	18.2 \pm 24	7.51 \pm 3.1	17.8 \pm 8.4	—
Cu	96.9 \pm 25	56.8 \pm 25	41.8 \pm 6.5	69.4 \pm 20	—
Zn	105 \pm 9.2	81.3 \pm 3.8	85.8 \pm 12	87.4 \pm 12	—
Sr	102 \pm 24	146 \pm 56	116 \pm 11	247 \pm 136	—
Mo	1.16 \pm 0.26	1.83 \pm 0.67	1.82 \pm 0.10	1.48 \pm 0.40	—
Cd	0.27 \pm 0.04	0.24 \pm 0.05	0.24 \pm 0.02	0.21 \pm 0.03	—
Ba	271 \pm 60	249 \pm 132	204 \pm 47	280 \pm 83	—
Pb	9.7 \pm 0.8	13.2 \pm 1.9	14.9 \pm 2.0	11.4 \pm 2.4	—
pH	7.01 \pm 0.20	6.00 \pm 0.48	5.8 \pm 0.30	5.87 \pm 0.24	—

ментов-примесей вулканитов и значимые корреляционные связи между ними, как это отмечалось выше, отсутствуют. Максимальные нагрузки на вторую компоненту имеют почвы ПР4, что указывает на активность процессов хелатообра-

зования и высокую степень участия этих металлов в органо-минеральных комплексах. В связи с этим представляется интересным тот факт, что в данном парагенезисе ассоциированы фельсифилы (Cd и Pb) и фемафилы (Cu, Zn и Fe). Это ука-

Таблица 3. Парагенезисы химических элементов в обобщенных факторных нагрузках, отвечающие за распределение металлов в почвах о. Шикотан, над чертой – положительные коэффициенты факторных нагрузок; под чертой – отрицательные коэффициенты факторных нагрузок (в формулах даны значения нагрузок, умноженные на 100)

Фактор	Название	Парагенезис	Доля фактора, %
Валовое содержание металлов в органогенном горизонте почв, $n = 28$			
I	Породный	$\frac{\text{Mo}_{43}}{\text{Mg}_{97}\text{Sc}_{92}\text{Ba}_{90}\text{Co}_{88}\text{Ni}_{88}\text{V}_{88}\text{Ca}_{86}\text{Na}_{86}\text{K}_{82}\text{Sr}_{82}\text{Cr}_{75}\text{Fe}_{74}}$	54.8
II	Органогенный	$\text{Cu}_{83}\text{Cd}_{75}\text{Zn}_{69}\text{Pb}_{66}\text{Fe}_{46}$	17.4
Валовое содержание металлов в органогенном (поверхностном) горизонте почв на профилях и участке Крабовозводское, $n = 46$			
I	Породный	$\text{Mg}_{95}\text{Sc}_{90}\text{Co}_{87}\text{Ni}_{87}\text{V}_{85}\text{Ca}_{80}\text{Sr}_{79}\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{69}\text{K}_{67}\text{Na}_{66}\text{Ba}_{49}$	45.9
II	Техногенный	$\text{Cu}_{78}\text{Cd}_{68}\text{Pb}_{67}\text{Zn}_{57}\text{Ba}_{50}$	16.7
Валовое содержание металлов в срединном горизонте почв, $n = 26$			
I	Породный	$\frac{\text{Mo}_{88}\text{Pb}_{80}\text{Cd}_{40}}{\text{Mg}_{97}\text{Co}_{88}\text{Cu}_{87}\text{Ba}_{87}\text{Ni}_{81}\text{Cr}_{81}\text{V}_{75}\text{K}_{71}\text{Sr}_{60}\text{Fe}_{57}\text{Ca}_{52}\text{Sc}_{41}}$	49.8
II	Формационный	$\frac{\text{Na}_{89}\text{Sr}_{68}\text{Ca}_{54}}{\text{Fe}_{74}\text{Sc}_{65}\text{Zn}_{65}\text{V}_{57}\text{Cd}_{57}\text{Co}_{41}}$	24.8

зывает на значимую роль почвообразовательных процессов в формировании химического состава гумусового горизонта.

Установленные выше закономерности подтверждаются результатами кластерного анализа обобщенной выборки (гумусовых и срединных горизонтов). На первом шаге кластеризации объединяются Fe и V, далее к ним присоединяется Co, затем Sc (рис. 4). Коэффициент парной корреляции Пирсона между концентрациями Fe и V составил 0.96 для гумусовых горизонтов и 0.94 для срединных. Сильная связь V и Fe в почвах подтверждается литературными данными [2]. Коэффициент парной корреляции между концентрациями Fe и Co составил 0.89 для гумусовых горизонтов и 0.76 – для срединных. Ванадий имеет более сильную связь с кобальтом: коэффициенты корреляции равны 0.92 и 0.85 для горизонтов А и В соответственно. Тесная взаимосвязь обнаружена между Mg и Ni, которые затем объединяются с перечисленными ранее металлами, формируя ассоциацию фемафилов. Халькофилы (Cu, Cd, Zn, Pb) имеют низкие парные коэффициенты корреляции и большое расстояние кластеризации.

Геохимическая характеристика типов почв. Как известно, химический состав почв определяется не только особенностями почвообразующих пород, но и внутрипочвенными процессами. Сравнительный анализ концентраций металлов в различных типах почв показал, что для петроземов характерны более высокие концентрации Na, Mg, K, Ca, V, Co, Cu, Sr, Ba как в гумусовых, так и в срединных горизонтах (рис. 5). Накопление Pb отмечается в лугово-дерновых почвах под луго-

выми сообществами (содержание Pb в 2.5–3.0 раза больше по сравнению с другими типами почв в гумусовых горизонтах и в 1.2–2.3 – в срединных). Вместе с тем лугово-дерновые глееватые почвы в значительной степени обеднены кальцием (в 2.6 раза меньше Ca в гумусовых горизонтах и в 1.5 раза в срединных) по сравнению с лугово-дерновыми типичными почвами. В буроземах и подбурях концентрации металлов примерно соответствуют средним фоновым значениям (рис. 5).

Отмеченные различия объясняются, прежде всего, особенностями состава и строения почв. Петроземы характеризуются низким содержанием гумуса по сравнению с подбурами, буроземами и лугово-дерновыми почвами. Небольшое количество органического вещества, слабо развитый профиль в сочетании с близостью коренных пород способствуют значительному влиянию почвообразующих пород на состав почвы, в том числе в увеличении концентрации типичных металлов-фемафилов. Это еще раз подчеркивает значительное влияние вулканитов на химизм не только петроземов, но и других типов почв о. Шикотан.

Важно отметить циркумокеаническое влияние на химический состав органогенного горизонта почв на площадках, расположенных в относительной близости к тихоокеанскому побережью острова (ПК 7-1, 7-2, 5-1 и 5-2): концентрации Na, Mg, K, Ca, катионы которых входят в состав морской воды, в 1.5–2.0 раза больше (рис. 6).

Кроме того, изменение содержания металлов в гумусовых горизонтах почв обусловлено сменой растительных сообществ (ольховых, березовых, пихтово-еловых лесов и разнотравно-сазовых лу-

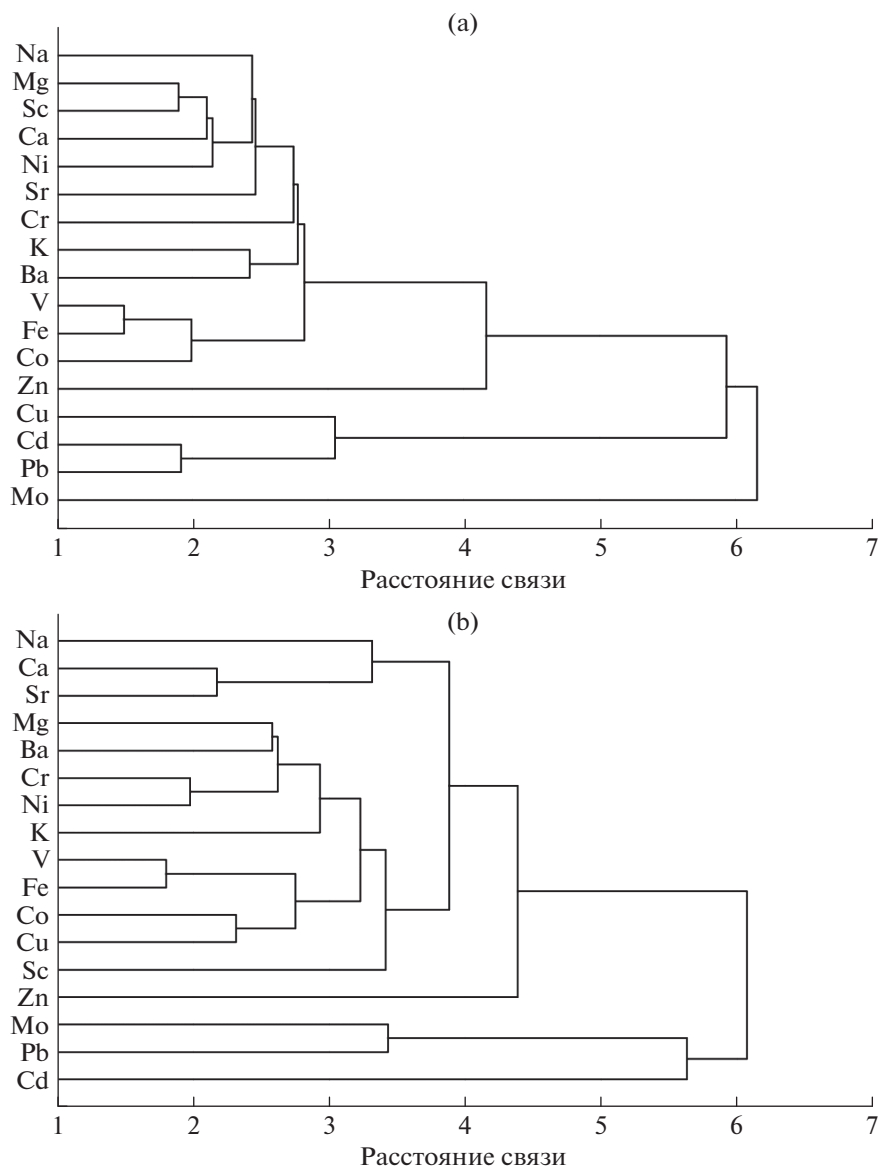


Рис. 4. Дендрограмма иерархического кластерного анализа содержания металлов в органогенных (а) и иллювиальных горизонтах (б) почв.

гов). Для почв ольшаников характерны большие (в 1.5–1.9 раз) концентрации Co по сравнению с почвами под пихтово-еловыми, березовыми и луговыми сообществами. Возможно, это вызвано влиянием Co на способность *Alnus* sp. фиксировать N_2 из воздуха [39]. Наряду с этим, в подбурях и буроземах, развитых под ольховыми сообществами, выше концентрации Mg, K, V, Fe, Ni (в 1.7–3.5 раза), Cu, Ba, Zn (в 1.5–2 раза). Для почв под пихтово-еловыми сообществами характерно высокое содержание Sr. На лугах в почвах концентрируются Na, Ca, Sr и Pb.

Перераспределение и миграция металлов в почвенной катене. Сравнение содержания металлов в органогенном и срединном горизонтах с использо-

ванием статистических критериев (критерия Стьюдента) показало, что их соотношение зависит от типа почв и геологического строения. Наибольшая дифференциация металлов между генетическими горизонтами почв выявлена в пределах матакотанского комплекса (ПР4). В срединном горизонте по отношению к гумусовому отмечается накопление Mg, Sc, V, Fe, Co, Ni и Cu. В органогенном слое аккумулируются Na, Mo и Pb. На территории развития Томари-Ноторо и малокурульского комплексов (ПР6) вертикальное перераспределение Na, Mg, Sc, V, Fe, Co, Ni, Cu и Mo в целом повторяет дифференциацию металлов в почвах ПР4, но в органогенном горизонте накапливается только Pb. В почвах, сформировавшихся в пределах шикотанского комплекса (ПР5 и ПР7), статистически зна-

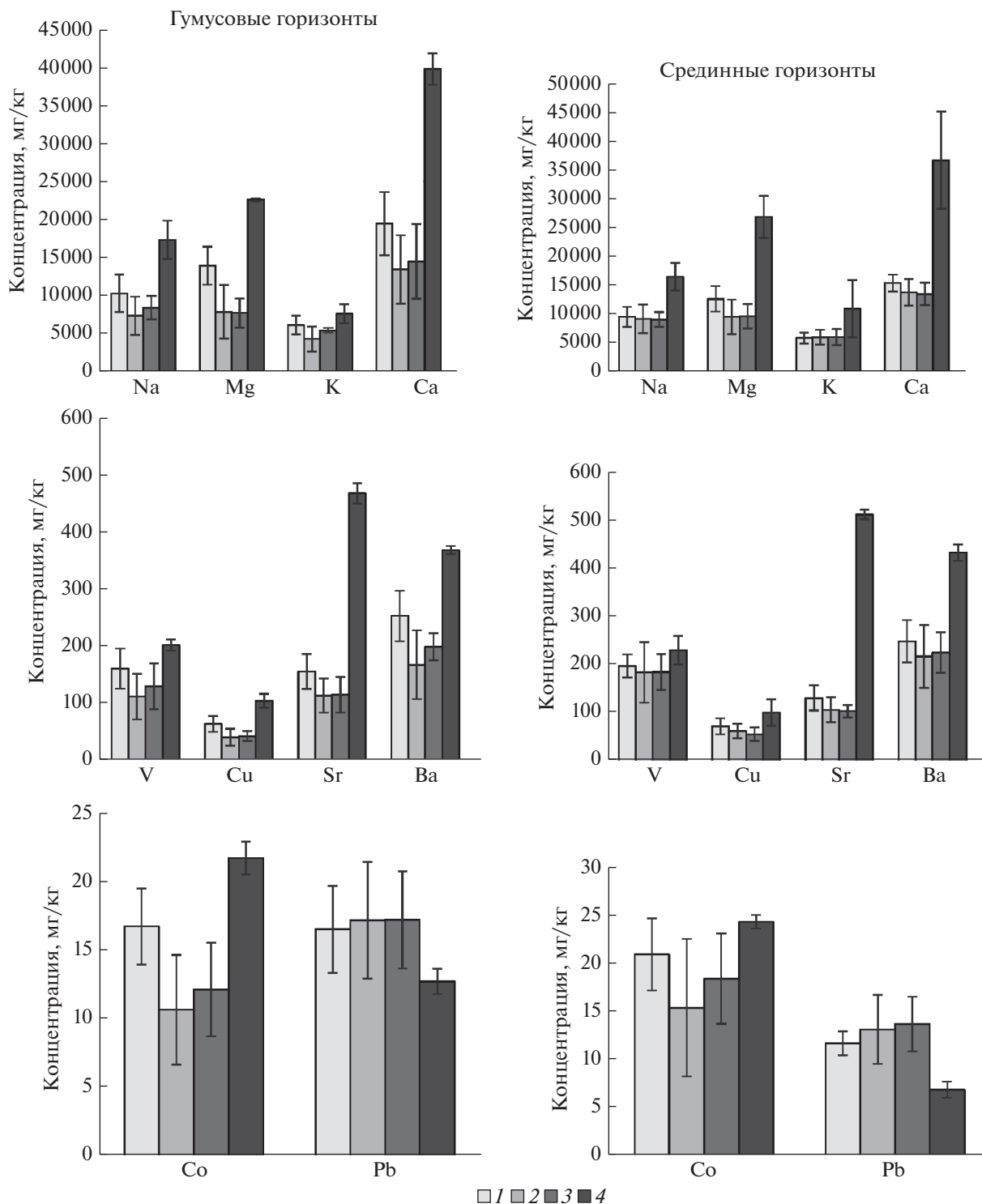


Рис. 5. Содержание металлов в различных типах почв: 1 – буроземах, 2 – подбурах, 3 – лугово-дерновой, 4 – петроземах.

чимые различия в содержании металлов в генетических горизонтах отсутствуют. Исключением являются накопление Fe в срединном горизонте (на обоих профилях) и аккумуляция Pb в органогенном горизонте почв на ПР7. Вероятно, отсутствие статистически достоверных различий в накоплении

металлов в генетических горизонтах почв на этих участках объясняется высокой дисперсией их содержания, что уже отмечалось ранее.

Расчет коэффициентов латеральной миграции (L) показал, что от элювиальных к супера-

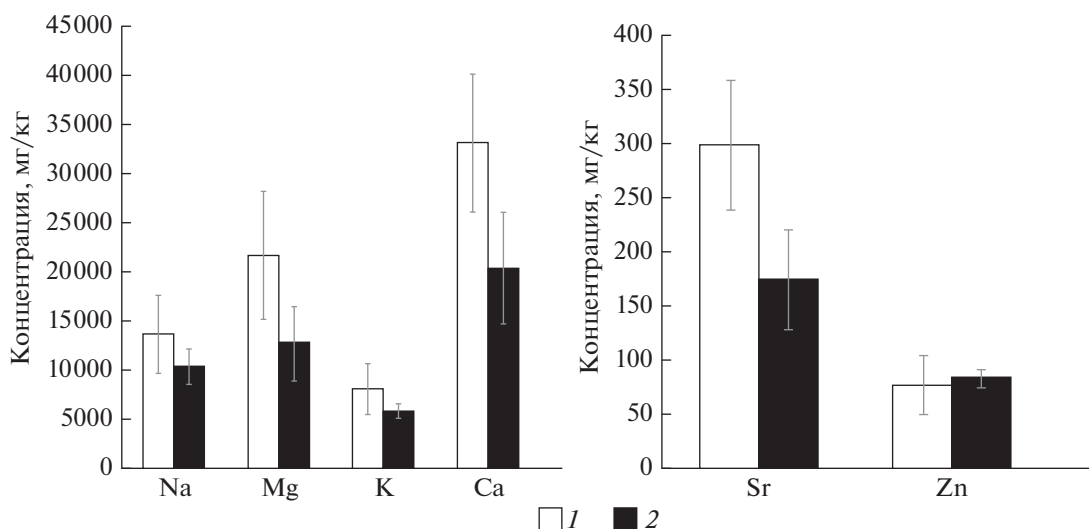


Рис. 6. Содержание щелочных металлов в гумусовых горизонтах почв прибрежных территорий: 1 – площадки на берегу океана, 2 – обобщенная выборка.

квалным ландшафтно-геохимическим позициям миграционная активность химических элементов значительно варьирует (табл. 4). Распределение металлов по элементам рельефа определяется геолого-геоморфологическими и кислотно-щелочными условиями. Так, на ПР4 перепад высот достигает 200 м, средняя величина рН почв – 6.80. Наиболее активная латеральная миграция ($L > 2$) отмечается для Cu, Ni, Cr и Co. На ПР5 L оценивался по двум ландшафтно-геохимическим катенам с перепадом высот 57 и 40 м. За исключением Mo, Cd, Pb и Zn, металлы имеют очень высокие значения коэффициента $L = 2-10$, максимальный миграционный потенциал отмечен у Cr, Fe, Co, V, Ca, Sc. Средняя величина рН составила 6.14 и 5.41 для первой и второй катен соответственно. Характерно, что в однородных геолого-геохимических условиях значения L растут при более низких рН, что хорошо согласуется с представлениями об увеличении подвижности металлов с ростом кислотности почвенных растворов [19, 39]. На ПР6 при небольшом перепаде высот (19 м) отмечаются относительно низкие значения величин L от 1.1 до 3.9. Наиболее активная латеральная миграция характерна для металлов-сидерофилов. На участке ПР7 от перевала к бухте Маячной до ПК4 перепад высот достигает 128 м, средняя величина рН 5.63. Здесь значения L указывают на очень низкую степень миграции металлов в латеральной структуре почвенной катены: только у Mg коэффициент превышает 2.

В целом особенности латеральной миграции металлов в ландшафтно-геохимической катене о. Шикотан можно представить в виде ряда уменьшения средних значений L : V (4.1) > Sc (4.0) > Fe (3.9) > Cr (3.9) > Co (3.8) > Ca (3.4) > Mg (3.2) > Na

(2.7) > Ni (2.5) > Cu (2.4) > Ba (2.1) > Sr (2.0) > K (1.6). Латеральная миграция Zn, Cd, Pb и Mo в изученных почвах оказалась очень слабой. Высокое значение L для слабоподвижных в гипергенезе Sc, V и Cr свидетельствует о том, что в пределах расчлененного рельефа механизмами латеральной миграции выступают не только солевой, но и механический сток металлов. Необходимо отметить общую закономерность, которая определяет характер миграции, – изменение рН почв. Наименьшие значения L типичны для ПР4 со средней величиной рН 6.80 (низкая подвижность металлов); максимальный коэффициент миграции – на ПР5 с минимальным значением рН 5.41 (относительно высокая подвижность катионогенных металлов). На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в условиях сильнорасчлененного рельефа прямая зависимость между интенсивностью миграции металлов и увеличением перепада высот и угла наклона поверхности исчезает.

Выявленная связь интенсивности латеральной миграции и рН имеет большое значение при определении устойчивости ландшафтов к химическому загрязнению. В свою очередь рН в ландшафтно-геохимической катене острова в определенной мере зависит от соотношения основных и средних типов подстилающих пород: увеличение доли андезитов ведет к уменьшению рН почв и повышению миграционного потенциала металлов, основные породы (базальтоиды) подщелачивают почвенные растворы и снижают подвижность металлов.

Региональный геохимический фон почв (ориентировочная оценка). Расчет проводили для всего почвенного покрова острова с учетом примерно

Таблица 4. Коэффициенты латеральной миграции металлов в ландшафтно-геохимической катене о. Шикотан

Металл	Профиль (перепад высот)					Среднее
	4 (203 м)	5 (57 м)	5 (40 м)	6 (19 м)	7 (128 м)	
Na	0.67	3.87	4.94	3.00	0.90	2.69
Mg	1.77	2.89	5.95	3.08	2.04	3.15
K	0.92	1.96	2.23	1.83	1.03	1.60
Ca	0.88	5.1	6.90	2.86	0.91	3.38
Sc	1.33	5.7	8.56	3.84	0.84	4.02
V	1.74	6.46	7.74	3.81	0.97	4.14
Cr	3.04	2.71	10.20	1.89	1.77	3.92
Fe	1.62	6.44	6.80	3.88	0.95	3.94
Co	2.08	3.94	7.17	3.65	1.91	3.75
Ni	2.22	1.36	6.15	1.37	1.57	2.53
Cu	2.12	2.24	3.89	2.03	1.80	2.42
Zn	1.17	1.44	1.86	1.72	0.77	1.39
Sr	0.54	2.47	3.38	2.41	1.12	2.00
Mo	0.49	1.1	1.43	1.81	0.38	1.04
Cd	0.62	0.9	1.02	1.42	0.53	0.90
Ba	0.90	2.39	3.33	2.31	1.52	2.09
Pb	0.49	0.5	0.73	1.13	0.49	0.67

одинакового распределения ПК по геологическим комплексам и типам почв. Региональный геохимический фон для гумусового и срединного горизонтов отразил высокую контрастность природных условий и геологического строения (табл. 5).

Изученные почвы о. Шикотан отличаются высоким содержанием Na, Mg, Sc, V, Fe, Co и Cu, превышающим кларк почв [29] в 2–5 раз, что характерно для областей основного вулканизма [23]. Концентрация K, Cr, Ni, Sr и Ba в 2–3 раза меньше кларка; сопоставимы с кларковыми значениями содержания Ca, Zn, Mo, Cd и Pb. Высокие концентрации V и Sc на всей территории острова связаны с вулканическими породами основного состава (базальты, габбро). Важными индикаторами изменчивости горных пород служат Mg и Fe, содержание которых в почвах колеблется от 2400 до 44400 и от 6300 до 81900 мг/кг соответственно. Увеличение их концентрации происходит в районах залегания базальтов, выступающих в качестве почвообразующих пород.

Техногенное загрязнение почв. Сопряженный анализ химического состава почв, ландшафтно-геохимической обстановки и источников антропогенного воздействия показал, что наряду с природными факторами существует локальное антропогенное загрязнение, определяющее варьирование содержания металлов в почвах изученной территории. На территории с. Крабозаводское к числу источников загрязнения относятся авто-

транспорт, котельная, рыбокомбинат, вертолетная площадка и объекты жилой инфраструктуры.

ПР4 и участок Крабозаводское расположены в однородных геологических условиях, по этим выборкам проводили сравнение статистических характеристик содержания металлов в поверхностном слое почв. По результатам анализа статистически достоверное превышение содержания на урбанизированном участке по отношению к фоновому выявлено по Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba и Pb. Это является основанием рассматривать данные металлы как потенциальные загрязняющие вещества, поступающие в почву в результате хозяйственной деятельности на территории села. Уровень загрязнения почв этими металлами в пределах застройки можно представить следующим рядом (в скобках отношение средних значений содержания элементов в органогенных горизонтах почв на урбанизированном участке и на ПР4): Pb (144) > Ba (6.0) > Ni (4.0) > Zn (3.7) > Cu (3.4) > Sr (3.2) > Co (2.1). Как правило, загрязнение носит локальный характер с относительно невысоким превышением фона. Исключением служит Pb с аномально высокой концентрацией (2370 мг/кг) на одном из участков жилой застройки.

С целью уточнения геохимической структуры и выявления участков загрязнения на изученной территории был выполнен факторный анализ содержания металлов в органогенном горизонте почв с включением в выборку почв с участка Крабозаводское. Полученные результаты показали,

Таблица 5. Фоновое содержание металлов (среднее \pm доверительный интервал на 5% уровне значимости) в горизонтах почв о. Шикотан, мг/кг

Элемент	Горизонт А ($n = 27$)	Горизонт В ($n = 26$)	Кларк почв [29]
Na	9300 \pm 1300	10200 \pm 1300	5000
Mg	10650 \pm 2450	12650 \pm 2450	5000
K	5700 \pm 670	6100 \pm 600	14000
Ca	17000 \pm 3300	16600 \pm 2600	15000
Sc	16.3 \pm 2.4	20 \pm 1.3	7.0
V	158 \pm 21	190 \pm 15.4	90
Cr	33 \pm 12.8	31 \pm 9.9	70
Fe	46300 \pm 5300	58100 \pm 3200	40000
Co	14.8 \pm 2.4	18.9 \pm 2.3	8.0
Ni	14.1 \pm 4.4	13.5 \pm 3.6	50
Cu	51 \pm 9.4	69 \pm 13.3	30
Zn	84 \pm 8.0	91 \pm 6.2	90
Sr	139 \pm 26	122 \pm 16.4	250
Mo	1.3 \pm 0.16	1.5 \pm 0.18	1.2
Cd	0.31 \pm 0.08	0.24 \pm 0.02	0.35
Ba	241 \pm 39	243 \pm 35	500
Pb	16.4 \pm 2.0	12.0 \pm 1.2	12

что в целом ассоциативность металлов в координатах главных факторов в органогенном горизонте фоновых территорий и в выборке с включением участка Крабовозаводское близка между собой. Первая компонента практически полностью повторяет породный фактор содержания металлов на условно фоновых территориях. Однако во втором факторе при ведущей роли халькофильных металлов, которые на основе статистических расчетов были отнесены к группе потенциальных загрязняющих веществ, их ассоциация расширяется за счет бария. Это позволяет рассматривать данный фактор как техногенный. По максимальным нагрузкам на второй фактор легко выделяются почвы, характеризующиеся техногенным загрязнением. К таким почвам относятся 14 поверхностных проб с урбанизированного участка. В этих пробах отмечается повсеместное загрязнение Cu (до 185 мг/кг), Zn (до 376 мг/кг), Pb (до 2370 мг/кг); в некоторых пробах установлено загрязнение Ni (42.4 мг/кг), Co (34.8 мг/кг), Ba (1300 мг/кг), Sr (375 мг/кг), Cd (0.74 мг/кг). В пределах изученных профилей по туристическим маршрутам выделено два участка с выраженным загрязнением металлами. Это почва супераквальной позиции ПР4, которая была отобрана в непосредственной близости к грунтовой дороге. Отмечается высокое загрязнение Cu (199 мг/кг), небольшое превышение содержания по Co (35.8 мг/кг). Вторая площадка – это нижняя позиция ПР6, представляющая собой площадку для отдыха участников неорганизованного познавательного туризма. В органогенном горизонте почвы выяв-

лено очень высокое содержание Cu (389 мг/кг), Cd (1.24 мг/кг) и Pb (189 мг/кг).

Расчет Z_c для перечисленных проб показал, что почвы характеризуются низким уровнем загрязнения: большинство из них относится к категории слабая степень загрязнения ($Z_c = 8-16$); на нижних позициях ПР6 почвы имеют среднюю степень загрязнения ($Z_c = 26$); на одном из урбанизированных участков, где содержание Pb в поверхностном слое почвы составляет 2370 мг/кг, категория загрязнения оценивается как очень сильная ($Z_c = 156$).

Корреляционный и регрессионный анализы подтвердили правильность интерпретации техногенного фактора. Коэффициент корреляции между величиной Z_c и нагрузками на техногенный фактор составил 0.78 (критическое значение 0.46 при $p = 0.05$). Регрессионный анализ показал, что рассматриваемая зависимость аппроксимируется логарифмической функцией с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.79$ (рис. 7).

Таким образом, можно говорить об антропогенном химическом загрязнении почв на ПК 101, 103, 109, 110, 113, 114, 122, расположенных на территории с. Крабовозаводское, а также на ПК 4-1 (залив Крабовый–гора Горобец) и ПК 6-1 (центральная часть о. Шикотан, вблизи гор Ноторо и Томари). Упомянутые площадки примыкают к хорошо наезженным дорогам, на ПР4 дорога ведет к старым оборонительным укреплениям. Площадка ПК 6-1 расположена около стоянки на

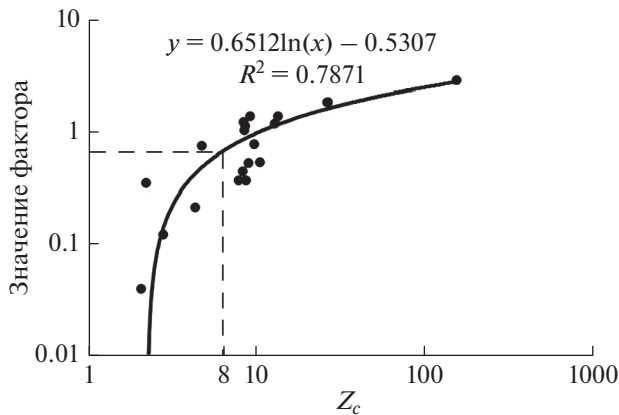


Рис. 7. Регрессионная зависимость суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) и значений техногенного фактора.

пути в бухту Церковная. Дорога активно используется местными жителями и туристами, отмечено наличие кострищ и места для стоянки автомобилей. ПК 101 (ул. Торговая 2) расположен в непосредственной близости к административным зданиям, автобусной остановке, частному сектору и местам выпаса крупного рогатого скота. Установлено загрязнение почв Cu, Pb, Ba. Вблизи ПК 103 (с. Крабовоздовское, угол ул. Дачная и ручья) отсутствуют значимые объекты инфраструктуры за исключением моста через ручей. Застройка – частный сектор с деревянными домами и металлоконструкциями. Загрязнение Pb, Zn и Cu связано, вероятно, с движением и стоянкой автомобилей, которые подъезжают к пункту забора воды (скважине). Свинец указывает на долговременное загрязнение почвенного покрова, медь входит в состав антикоррозионных покрытий автомобилей, цинк используется при вулканизации автопокрышек. Загрязнение на ПК 109 (с. Крабовоздовское, к югу от ул. Торговая, между ул. Молодежная и ул. Строителей) объясняется расположением в нескольких метрах от вертолетной площадки. Вблизи ПК 110 (берег ручья между ул. Лесная и ул. Строителей), где обнаружено захламление бытовым мусором, почвы характеризуются повышенным содержанием Cu и Ba. На ПК 113 (склон в долине ручья между ул. Зеленая и ул. Строителей, на уровне северного окончания ул. Лесная) и 114 (склон долины ручья между ул. Лесная и ул. Строителей, к юго-востоку от ул. Зеленая) отсутствуют объекты инфраструктуры, возможно поступление поллютантов происходит с территории, расположенной гипсометрически выше, поскольку ближайшие постройки и автодорога находятся на расстоянии первых десятков метров. На ПК 122 (исток р. Анама) поступление Cu вызвано окислением металлоконструкций, складываемых вблизи.

По результатам сравнения валового содержания металлов в почвах с. Крабовоздовское и фоновых территорий основными индикаторами антропогенной нагрузки выступают Cu, Zn и Pb.

ВЫВОДЫ

1. Химический состав почв о. Шикотан отличается значительной контрастностью и зависит от состава почвообразующих пород, ландшафтно-геохимических и отчасти циркумокеанических условий. Почвам свойственен высокий естественный уровень содержания фемафильных элементов Sc, V, Fe, Cu, Zn, превышающий кларки. Концентрация K, Cr, Ni, Sr и Ba меньше кларка, содержание Ca, Mo, Cd и Pb сопоставимо с кларковыми значениями.

2. Ведущим фактором, определяющим миграцию и аккумуляцию химических элементов в почве, является величина pH, которая регулируется соотношением почвообразующих пород основного и среднего составов. На базальтоидах отмечается подщелачивание почвенных растворов, уменьшающее миграционную способность металлов и приводящее к росту устойчивости почв к химическому загрязнению. На андезитах (андезибазальтах) выражено подкисление почв и снижение их буферных возможностей.

3. Ландшафтно-геохимическая дифференциация территории определяется разными типами почв и многообразием растительных сообществ. Максимальные концентрации Na, Mg, K, Ca, V, Co, Cu, Sr и Ba характерны для петроземов (как в органо-аккумулятивных, так и в срединных горизонтах). В лугово-дерновых почвах под сазовыми сообществами отмечается накопление Pb. В буроземах и подбурях концентрация металлов в основном соответствует средним фоновым значениям. Изменение содержания металлов в гумусовых горизонтах обусловлено сменой растительных сообществ (ольховых, березовых, пихтово-еловых лесов и разнотравно-сазовых лугов). В подбурях и буроземах под ольховыми сообществами выше концентрация Co, Mg, K, V, Fe, Ni, Cu, Ba, Zn. Для почв под пихтово-еловыми сообществами характерно высокое содержание Cr. В почвах на лугах концентрируются Na, Ca, Sr и Pb.

4. В условиях гумидного климата и расчлененного рельефа механизмом латеральной миграции выступает не только солевой, но и механический сток металлов, приводящий к дифференциации в катене литофильных и сидерофильных элементов. Cr, Co, Ni закрепляются в гумусовых горизонтах подчиненных ландшафтов, а Cd и Pb тяготеют к поверхностным горизонтам автономных фаций. В почвах морских террас, где существенно влияние океанических воздушных масс, отмечается повышение кислотно-щелочного показателя

и увеличение концентрации металлов, катионы которых входят в состав морской воды – Na, Mg, K и Ca.

5. Антропогенное загрязнение почв, выявленное на основе статистического анализа, носит локальный характер. Из изученных металлов потенциальными поллютантами на о. Шикотан в настоящее время являются Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba и Pb. Большинство образцов почвы с урбанизированного участка и две пробы с туристических маршрутов характеризуются высоким содержанием металлов. Основным источником загрязнения служит автомобильный транспорт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество” № 14-2021-Р.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакланов П.Я., Бочарников В.Н., Ганзей К.С. и др.* Атлас Курильских островов. М.–Владивосток: ИПК “ДИК”, 2009. 515 с.
2. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 86 с.
3. *Воробьев Д.П.* Растительность Курильских островов. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 92 с.
4. *Гаврилов В.К., Соловьева Н.А.* Вулканоогенно-осадочные формации геоантиклинальных поднятий Малых и Больших Курил. Новосибирск: Наука, 1973. 151 с.
5. *Гладкова Г.А., Бутовец Г.Н.* Лесные вулканические почвы острова Кунашир // Почвоведение. 1988. № 2. С. 54–67.
6. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 350 с.
7. *Голов В.И.* Круговорот серы и микроэлементов в основных агроэкосистемах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2004. 315 с.
8. *Грищенко М.Ю., Гаврилова В.И., Карпачевский А.М., Петровская А.Ю., Леонова Г.М.* Изучение и картографирование почв и ландшафтов полуострова Весловский (остров Кунашир, Курильские острова) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 1. С. 63–69. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-1-63-69>
9. *Грищенко М.Ю., Хлюстова В.В., Изюмникова Е.А., Калимова И.В.* Изучение и картографирование почв южной части охотоморского сектора острова Кунашир, Курильские острова // Геодезия и картография. 2021. № 3. С. 19–27. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2021-969-3-19-27>
10. *Дьмов А.А., Лаптева Е.М., Калашиников А.В., Денева С.В.* Фоновое содержание тяжелых металлов, мышьяка и углеводородов в почвах Большеземельской тундры // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 4. С. 43–48.
11. *Дьяченко В.В., Матасова И.Ю.* Региональные кларки химических элементов в почвах европейской части юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166.
12. *Еременко Н.А.* Сезонное развитие растений и растительных сообществ Южных Курильских островов. Автореф. дис. ... канд. биол. н. Владивосток, 2004. 21 с.
13. *Ивлев А.М., Таргульян В.О., Куликов А.В.* Почвы острова Кунашир // Почвенный покров Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1982. С. 30–49.
14. *Касимов Н.С., Власов Д.В.* Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2015. № 2. С. 7–17.
15. *Колосков А.В., Федоров П.И., Окина О.И.* Новые данные о составе интрузивных пород о. Шикотан (малая Курильская гряда) // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2019. Вып. 43. № 3. С. 52–65.
16. *Костенков Н.М., Ознобихин В.И.* Почвенно-географическое районирование Курильских островов // Вестник СВНЦ ДВО РАН. № 1. 2011. С. 77–83.
17. *Линник Е.В.* Заповедник “Курильский” // Биота и среда заповедных территорий. 2019. № 1. С. 110–124. <https://doi.org/25808/26186764.2019.18.97.008>
18. *Московченко Д.В.* Нефтегазодобыча и окружающая среда, эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
19. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сомов В.В., Митрофанова Е.С., Кукушкин С.Ю.* Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчиненных ландшафтах // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2018. № 1. С. 14–24.
20. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439.
21. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Сомов В.В., Папаян Э.Э.* Использование биоиндикационных свойств растительности при оценке трансформации ландшафтов в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Сибирский экологический журнал. № 3. 2017. С. 350–366.
22. *Пискунов Б.Н.* Природа базальтоидов Большой и Малой Курильских гряд // Литосфера. 2004. № 3. С. 97–109.
23. *Полохин О.В.* Содержание микроэлементов в вулканических почвах острова Симушир (Курильские острова) // Сб. мат-лов V Межд. научной конф., посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ. Томск: Изд-во ТГУ, 2015. С. 84–87.
24. *Полохин О.В., Сибирина Л.А.* Почвенный и растительный покров острова Итуруп (Курильские острова) // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 618.
25. *Разжицаева Н.Г., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Гребенникова Т.А.* Стратиграфия торфяника долины

- р. Горобец и развитие природной среды о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в голоцене // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 4. С. 82–98.
26. Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д., Ктиторев П.С., Савченко Г.Г., Сундуков Ю.Н. Памятник природы “Филлодендровая роща на острове Шикотан” // Вестник Сахалинского музея. № 1 (22). 2015. С. 284–302.
 27. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. 990 с.
 28. Терехов Е.П., Цой И.Б., Можеровский А.В., Вагина Н.К. Плиоценовые отложения острова Шикотан (малая Курильская гряда) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. том 19. № 3, С. 96–110.
 29. Требования к геохимической основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1000000 (новая редакция). М., 2005. 28 с.
 30. Фуряев Е.А. Геохимические особенности ландшафтов острова Кунашир (Курильские острова). Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 153 с.
 31. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
 32. Alfaro M.R., Montero A., Ugarte O.M., Nascimento C.W., Aguiar Accioly A.M., Biondi C.M., Silva Y.J. Background concentrations and reference values for heavy metals in soils of Cuba // Environ. Monit. Assess. 2015. V. 187. P. 4198–4208. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4198-3>
 33. Almeida Júnior A.B., Nascimento C.W.A., Biondi C.M., Souza A.P., Barros F.M.R. Background and Reference Values of Metals in Soils from Paraíba State, Brazil // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2016. V. 40. P. e0150122. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150122>
 34. Bini C., Sartori G., Wahsha M., Fontana S. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy // J. Geochemical Exploration. 2011. V. 109. P. 125–133.
 35. Carion C. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization. Eur. Commission. Ispra. Joint Research Centre. 2007. 306 p.
 36. Galuszka A. A review of geochemical background concepts and an examples using data from Poland // Environ. Geol. 2007. 52. P. 861–870.
 37. Heemsbergen D., Warne M., McLaughlin M., Kookana R. The Australian Methodology to Derive Ecological Investigation Levels in Contaminated Soils. CSIRO Land and Water Science Report 43/09. 2009. 75 p.
 38. IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. E-ISBN 978-92-5-108370-3.
 39. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 2011. 548 p.
 40. Rudnick R.L., Gao S. The Composition of the Continental Crust // Treatise Geochem. 2003. V. 3. P. 1–64.
 41. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.
 42. Zhao F.J., Mcgrath S.P., Merrington G. Estimates of ambient background concentrations of trace metals in soils for risk assessment // Environ. Poll. 2007. V. 148. P. 221–229.

Natural and Anthropogenic Factors of Soils Chemical Composition on Shikotan Island (Kuril Islands)

M. Opekunova^{1,*}, A. Opekunov¹, V. Somov¹, S. Kukushkin¹,
I. Arestova¹, S. Lisenkov¹, and A. Nikulina¹

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199178 Russia

*e-mail: m.opekunova@mail.ru

The chemical composition of the soils (Haplic Andosols) of Shikotan Island (Lesser Kuril Chain) formed on volcanic rocks of different composition and age has been studied. The background content of metals (Ba, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Cr, Fe, V, Sc, K, Sr, Na, Ca, Mo) in soils was estimated using inductively coupled plasma mass spectrometry with complete acid digestion of samples. Total content of chemical elements undergoes abrupt changes and depends on bedrock composition, zonal and azonal geochemical landscapes differentiation, influence of oceanic air masses and the plant communities' composition. High natural concentrations (exceeding clarks) of femaphilic elements (Sc, V, Fe, Cu, Zn) are typical for soils. The concentrations of Ca, Mo, Cd and Pb are comparable to clarks and those of K, Cr, Ni, Sr and Ba are lower. The main factor of migration and accumulation of chemical elements in soil is acidity regulated by the ratio of intermediate and mafic rocks. Humid climate and contrasting relief of the island cause intensive migration of chemical elements not only in dissolved but also in particulated forms. It leads to different distribution of lithophilic and siderophilic elements in catenas. Cr, Co, Ni are fixed in topsoil of subordinate facies while Cd and Pb are abundant in topsoil of autonomous facies. Statistical data processing included correlation, cluster and principal component analyzes (Statistica 12.0). The results indicate local chemical contamination of soil within Krabozavodskoye village and in some areas affected by educational tourism. The main source of contamination are vehicles.

Keywords: regional geochemical background, lateral migration, anthropogenic pollution