

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.2.:550.4

И.А. Авессаломова¹, А.Н. Иванов², А.В. Савенко³**ВОДНАЯ МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАНДШАФТАХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КУРИЛ (НА ПРИМЕРЕ о. МАТУА)**

По данным гидрохимического опробования о. Матуа (Центральные Курилы) установлены основные характеристики атмосферных, подземных и поверхностных вод в контактной полосе вулканических построек и морских террас. Отмечены их различия по величине pH, минерализации, содержанию главных ионов, биогенных элементов (Si, P) и микроэлементов группы железа (Ti, V, Mn, Fe). Для выявления роли литогенного фактора при формировании инфильтрационных вод в качестве индикаторов предложены Ca, Mg, Si, $P_{\text{мин}}$, V и Ti. Показано, что концентрации растворенных форм этих элементов меняются в зависимости от местоположения зон разгрузки подземных источников и снижаются в водах низких морских террас. С использованием коэффициентов водной миграции установлена различная подвижность и контрастность поведения химических элементов и возможность аккумуляции Fe, Mn и $P_{\text{орг}}$ в ручьях и озерах при их соседстве с гидроморфными болотными ландшафтами.

Ключевые слова: о. Матуа, вулканические постройки, морские террасы, тейфра, химический состав вод, интенсивность водной миграции.

Введение. Несмотря на большой интерес, проявляемый в последние годы к геохимическим процессам, протекающим на вулканических островах и прилегающих к ним акваториях морей, общие закономерности до сих пор во многом не до конца ясны. Это в полной мере относится к водной миграции химических элементов. При ее изучении необходим учет факторов, определяющих формирование и трансформацию водных потоков в зоне гипергенеза. Анализ литературных данных [Торохов, Черткова, 1990; Рычагов с соавт., 2002, 2004; Жарков, Побережная, 2008; Комплексная экспедиция ..., 2009; Чудаев, Чудаева, 2009; Козлов, Жарков, 2010; Котенко, Котенко, 2010; Захарихина, Литвиненко, 2011; Лобкина, Казакова, 2011; Разжигаяева с соавт., 2012, 2013; Гребенникова, 2016] показывает, что формирование химического состава вод вулканических островов происходит под действием комплекса факторов, связанных с историей развития и интенсивностью вулканической деятельности, функционированием гидротермальных систем, а также с влиянием атмосферных осадков и океанических вод. Выявлены ассоциации сидерофильных, халькофильных и литофильных микроэлементов, характерные для разных типов вод, и вторичные минералы, образующиеся при их взаимодействии с породами. Важным механизмом аккумуляции химических элементов служат геохимические барьеры в зонах разгрузки грунтовых вод.

При анализе факторов формирования состава поверхностных вод важен учет поступления веществ с аэральными потоками. При таянии снега происходит увеличение кислотности и агрессивности поверхностных вод, сопровождающееся выщелачиванием элементов из вулканических пород. Воды, циркулирующие в пеплах андезитового состава, характеризуются высоким содержанием хлоридов, сульфатов и повышенной кислотностью, что способствует выщелачиванию водорастворимых форм химических элементов из почв [Захарихина, Литвиненко, 2011]. Одним из факторов формирования состава снежного покрова на островах является поступление морских аэрозолей, мигрирующих с воздушными потоками, которое приводит к увеличению концентрации ионов Cl, SO₄, Na, Mg, Ca в снеге вдоль береговой полосы на обращенных к морю наветренных склонах. Наряду с барьерной ролью хребтов возрастанию аккумуляции морских ионов в снеге способствует отсутствие ледового припая [Лобкина, Казакова, 2011].

Гидрохимическое своеобразие островов усиливается при появлении озер, различающихся по генезису и источникам питания. Для мелководных и окаймленных болотными массивами озер отмечено распространение слабокислых вод умеренной минерализации и неоднократное изменение их уровня в связи с пеплопадами и климатическими флук-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: aiageo@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: alla_savenko@rambler.ru

туациями среднего голоцена. На побережьях выявлены изменения гидрохимической обстановки и уменьшение кислотности в болотах после затопления во время цунами [Разжигаева с соавт., 2012, 2013; Гребенникова, 2016].

В совокупности разнообразии факторов формирования химического состава вод и их соотношения оказывают влияние на интенсивность вовлечения химических элементов в водные потоки и их аккумуляцию на геохимических барьерах, что определяет специфику вулканических островов с различной ландшафтной структурой. Очевидно, что расширение числа объектов изучения имеет большое значение для выявления общих закономерностей водной миграции химических элементов на вулканических островах.

Цель настоящей работы заключалась в установлении основных гидрохимических характеристик атмосферных, подземных и поверхностных вод в контактной полосе вулканических построек и морских террас о. Матуа (Центральные Курилы), выявлении факторов формирования их химического состава и связи интенсивности водной миграции элементов с ландшафтно-геохимическими условиями.

Материал и методы исследований. Объект исследований – о. Матуа площадью 52 км² – расположен в средней части Курильской островной дуги. На острове находится один из наиболее активных современных Курильских вулканов – Пик Сарычева (высота 1446 м над уровнем моря), для которого только за последние 250 лет достоверно отмечено не менее 10 извержений, включая последнее крупное извержение в июне 2009 г. [Дегтерев, 2011]. Породы, извергаемые вулканом на современном этапе, по химическому составу соответствуют андезитобазальтам [Дегтерев с соавт., 2012]. По данным метеостанции Матуа за 1947–1996 гг., ежегодно на острове выпадает в среднем 1278 мм осадков, но при этом постоянные водотоки практически отсутствуют, поскольку подавляющая часть осадков фильтруется через мощный чехол грубых пирокластических отложений в глубинные слои. В условиях умеренного морского климата с аномально холодным для 48° с. ш. летом (+5...+11°C) растительный покров о. Матуа представлен верещатниковыми тундрами, луговыми сообществами и зарослями ольхового стланика. В пределах островного вулканического ландшафта выделяются 3 географические местности – современных вулканических пустынь, древних вулканических построек вулкана Матуа и морских террас [Иванов, 2017].

С методологической точки зрения при изучении вулканических островов перспективно использование концепции нуклеарных геосистем, включающих ядро и поле его воздействия [Ретеюм, 1988]. В истории развития о. Матуа эндогенный потенциал активного ядра, центробежное движение вещества и неоднократность извержений способствовали усложнению структурно-функциональной организации ландшафта (древние вулканические постройки вулкана Матуа, молодой конус вулкана Сарычева).

Используя геохимический подход, его можно рассматривать как каскадную ландшафтно-геохимическую систему (КЛГС), целостность которой поддерживается нисходящими потоками, связанными с механической, воздушной и водной миграцией (излияние лав, сход лахаров и горячих туч, включение пирокластического материала в гравигенные потоки, разгрузка подземных вод и др.). При рассмотрении водной миграции химических элементов необходимо учитывать, что специфика миграционной структуры островов проявляется в нижних звеньях КЛГС, где нисходящие водные потоки попадают в зону влияния встречных потоков со стороны моря, особенно во время приливов или цунами.

Ярусное строение КЛГС обусловлено метахронностью и полигенезом структурных подразделений, различающихся по набору доминантных элементарных ландшафтов. Для верхнего яруса, включающего стратовулкан Пик Сарычева, характерно преобладание абиогенных трансэлювиальных элементарных ландшафтов, приуроченных к разновозрастным лавовым и пирокластическим потокам, образовавшимся во время эруптивной активности голоцена. Изверженные породы этого периода относятся к умеренно-калиевым известково-щелочным андезитобазальтам [Дегтерев, 2011]. Обособление среднего яруса связано с вулканическими постройками вулкана Матуа, формированием кальдеры и напряженной эксплозивной деятельностью в ее пределах в позднем плейстоцене–голоцене. Усложнение катенарной организации определяется сочетанием автономных (вулканические плато) и трансэлювиальных (молодые лавовые потоки и др.) примитивно-пустынных, горно-тундровых, горно-луговых и стланиковых элементарных ландшафтов. Нижний ярус включает серию аккумулятивных и цокольно-аккумулятивных морских террас, сформировавшихся на фундаменте слабодислоцированных вулканогенных и вулканогенно-осадочных третичных пород. Увеличению контрастности геохимических сопряжений способствует появление трансаккумулятивных комплексов на конусах выноса лахаров и суперкальвиальных комплексов в озерных котловинах, а также соседство элементарных ландшафтов с зарослями ольховника, лугами и болотами. Свообразие ландшафтной структуры морских террас определяется широким развитием беллигеративных комплексов.

На цокольно-аккумулятивных террасах высокого (40 м) и низкого (10–15 м) уровней галечники перекрыты слоистым почвенно-пирокластическим чехлом, верхняя часть которого представлена позднеголоценовой андезитобазальтовой тефрой. По данным А.В. Дегтерева с соавт. [2012], в ней определены средние содержания макро- и микроэлементов и рассчитаны их кларки концентрации (КК). Расчет проводился в двух вариантах: по отношению к кларку литосферы А.П. Виноградова [1962] и Р.Л. Рудник с С. Гао [Rudnick, Gao, 2003]. Близость полученных значений позволила в дальнейшем использовать при выделении парагенных ассоциаций элементов кларки А.П. Виноградова. По срав-

нению с другими макроэлементами отмечается повышенная степень накопления Ca ($KK = 2,2$) и низкая – K ($KK = 0,34$), что при содержании SiO_2 от 51,9 до 55,1 мас.% соответствует умеренно-калевой известково-щелочной серии андезитобазальтов. Парагенная ассоциация накапливающихся микроэлементов включает (по мере убывания $KK > 1$) Yb, V, Sc, Mn, Sr, Ti, Mo, Cu и Co, большинство которых, согласно А.И. Перельману [1989], специфично для основных пород. Грубый гранулометрический состав пирокластики (преобладание вулканического гравия и лапиллей при подчиненном участии прослоев тонкого пепла) благоприятствует формированию инфльтрационных водных потоков, разгружающихся у тылового шва разновысотных террас. При расчете коэффициентов водной миграции элементов использовалось их содержание в верхнеголоценовой тефре.

Гидрохимическое опробование о. Матуа проводилось в мае–июне 2016 г. на 24-х точках и включало отбор проб из разных типов встречающихся на острове водных объектов (снег, лед, родники, ручьи и озера), расположенных во всех трех ярусах КЛГС. На шести точках был выполнен отбор проб воды двукратной повторности – в третьей декаде мая (середина–конец снеготаяния) и в третьей декаде июня (начало вегетации). Всего было взято 30 проб воды.

Величину pH измеряли *in situ* с помощью портативного pH-метра-иономера «Эксперт-001» с точностью $\pm 0,01$ ед. Подготовку и консервацию растворов для лабораторных анализов выполняли сразу после отбора проб. Для анализа содержания главных ионов пробы фильтровали через плотные бумажные фильтры; для анализа содержания биогенных элементов (Si, $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{орг}}$) после аналогичной фильтрации в пластиковые флаконы добавляли небольшое количество хлороформа (1 мл на 100 мл пробы); для анализа содержания микроэлементов (Ti, V, Mn, Fe) растворы отфильтровывали через мембранные фильтры 0,45 мкм в полипропиленовые флаконы с предварительно внесенными туда аликвотами 5 N азотной кислоты марки ос. ч. (0,2 мл на 8 мл пробы).

Величину общей щелочности, подавляющую часть которой составляют гидрокарбонаты, определяли объемным ацидиметрическим методом; концентрации других главных ионов (Cl, SO_4 , Na, K, Mg, Ca) – методом капиллярного электрофореза. Содержание растворенных форм $P_{\text{мин}}$ и Si анализировали колориметрическими методами с добавлением соответственно молибдата аммония с аскорбиновой кислотой и молибдата аммония с солью Мора. Концентрацию общего (минерального и органического) растворенного фосфора определяли по той же методике, что и минерального, но с предварительным окислением органического вещества персульфатом калия при кипячении в течение 1,5 ч. При определениях концентраций растворенных микроэлементов использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP-MS. Погрешность измерений не превышала $\pm 3\%$.

Результаты исследований и их обсуждение.

Сопоставление химического состава вод о. Матуа в нижних ярусах КЛГС выявило различия гидрохимических параметров по степени варьирования их значений. Наибольшим постоянством отличаются щелочно-кислотные условия вод, которые относятся к нейтральным (коэффициент вариации C_v для величины pH составляет 9%). Среди главных ионов наименьшая варибельность характерна для калия и сульфатов ($C_v = 48\%$), тогда как изменчивость содержания гидрокарбонатов, кальция, магния и натрия больше ($C_v = 53–66\%$) и достигает максимума ($C_v > 70\%$) для хлоридов и растворенных форм биогенных элементов (Si, $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{орг}}$). Для выявления факторов формирования химического состава водных потоков все объекты опробования были разделены на 10 групп в зависимости от приуроченности зон разгрузки грунтовых вод и близости моря (табл. 1).

Факторы формирования химического состава природных вод. Представление о поступлении вещества с атмосферными осадками дают результаты анализа снега и талых вод снежников, приуроченных к примитивно-пустынным природным комплексам вулканических плато. Воды вытекающих из них ручейков слабокислые ультрапресные хлоридно-натриевые с незначительной долей сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и магния (по 6,9 %-экв). В целом это согласуется с данными по ионному составу снега на островах рассматриваемого региона [Котенко, Котенко, 2010], хотя на о. Парамушир вне действия вулкана Эбеко хлоридов содержится меньше, чем на о. Матуа.

По сравнению со снеговыми нейтральные грунтовые воды и связанные с ними воды временных и постоянных ручьев отличаются более высокими значениями pH, минерализации и соответственно увеличением содержания главных ионов (при преобладании Na и Cl). Степень этих изменений зависит от локализации зон разгрузки, а воды родников по нарастанию минерализации образуют следующий ряд: 1) контакт древних лавовых потоков и морских террас (89–92 мг/л); 2) контакт морских террас высотой 15 и 10 м (94 мг/л); 3) тыловой шов высокой морской террасы 40 м (120 мг/л).

Состав хлоридно-натриевых (%-экв: Cl – 29, HCO_3 – 11, SO_4 – 10; Na – 31, Ca – 11, Mg – 8) вод поверхностных водотоков унаследован от разгружающихся грунтовых вод. Весной при снеготаянии минерализация вод ручьев (79–83 мг/л) на низких морских террасах (р. Хесупо и др.) меньше, чем в родниках, но приближается к ним уже в начале вегетационного периода в связи с уменьшением доли талых вод и усилением процессов выщелачивания в почвах и подстилающих породах. В нижнем течении ручьев, попадающих в зону штормовых нагонов, отмечается увеличение минерализации до 123 мг/л за счет талассофильных элементов (Cl, Na) и появление слабощелочных условий среды при последовательном увеличении pH от 7,8–7,9 в устьях рек до 8,1 в прибрежных водах бухт.

Таблица 1

Щелочно-кислотные условия, минерализация (M) и ионный состав природных вод о. Матуа

№	Объект опробования вод	Число проб	Место-нахождение	pH	M, мг/л	Содержание ионов, мг/л						
						Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	SO ₄	Cl
Ручьи из снежников вулканических пустынь												
1	Талые воды, снег, лед	4	Лавовые плато	5,83	9,5	2,36	0,30	0,25	0,35	1,45	1,15	3,69
Зона разгрузки грунтовых вод на контакте лавовых потоков и низких морских террас												
2	Родник на контакте древнего лавового потока и террасы 10 м	1	Район бухты Айну	7,01	92,5	14,8	1,72	3,09	8,23	25,5	18,0	21,2
3	Родник на контакте древнего лавового потока и террасы 20 м	1	То же	6,95	88,8	19,7	1,40	2,87	6,22	11,6	15,6	31,4
Зона разгрузки грунтовых вод лавовых плато и высоких морских террас (40 м)												
4	Ручьи у тылового шва высоких террас	5	Район бухты Двойная	7,20	120	21,1	2,14	3,64	11,4	35,1	13,8	32,9
5	Ручей с лавовых плато мыса Ключ в зоне штормовых нагонов	1	То же	7,25	250	67,4	3,38	7,79	9,96	15,9	18,7	127
Зона разгрузки грунтовых вод на контакте низких морских террас (15 и 10 м)												
6	Родники	3	Район бухты Айну	6,84	94,5	18,4	1,43	2,77	8,00	20,7	14,2	29,0
7	Ручьи	8	То же	7,28	88,2	19,2	1,42	2,66	6,22	17,4	13,6	27,7
8	Ручей в зоне штормовых нагонов	1	–	7,76	123	31,3	2,02	3,51	4,29	17,1	18,5	46,5
9	Озера в суффозионной ложбине	5	–	7,18	90,7	18,6	1,32	2,73	6,82	20,6	12,2	28,4
10	Озера заболоченных западин	2	Район бухты Южная	6,15	29,6	7,78	0,68	0,68	0,82	5,19	3,72	10,7

По гидрохимическим параметрам на морских террасах выделяются две группы озер. Одна из них включает озера в суффозионной ложбине бухты Айну, которые по составу вод мало отличаются от ручьев. В другую группу вошли озера бухты Южной, сопряженные с суперквальноными элементарными ландшафтами сфагново-осоковых болот в понижениях между береговыми валами. Высокая гидроморфность, низкая скорость разложения органического вещества и замедленность биологического круговорота определяют развитие кислой среды и низкую минерализацию (30 мг/л) их вод. Противоположная ситуация характерна для отделенного проливом о. Топорковый, где располагаются колонии птиц и зафиксирована максимальная для озерных вод минерализация (105 мг/л), а также отмечаются повышенные концентрации большинства главных ионов, в том числе K. Возможность обогащения вод биогенными элементами под влиянием орнитогенного фактора была ранее показана для островов Северной Пацифики [Иванов, Авессаломова, 2008].

В пределах высоких цокольно-аккумулятивных морских террас инфильтрационные воды формируются при прохождении через толщу пирокластического материала, морские галечники и вулканогенные

породы цоколя. Выщелачивание элементов из андезитобазальтовой тефры сопровождается увеличением доли Ca и гидрокарбонатов (по 16%-экв) в составе подземных вод и связанных с этим источником питания ручьев. Максимальная минерализация (250 мг/л) обнаружена в районе мыса Ключ в ручье, стекающем к морю по заросшему ольховником лавовому потоку (рис. 1). На формирование этих вод оказывает воздействие комплекс факторов: выщелачивание Ca, Mg и K из андезитобазальтов и тефры; вовлечение в водную миграцию элементов, участвующих в биологическом круговороте; близость моря и поступление Cl и Na при заплесках и штормовых нагонах. Учитывая резкое увеличение содержания этих легкоподвижных элементов (Cl – 127 мг/л, Na – 67 мг/л), нельзя исключить влияния гидротерм, что требует дополнительной проверки.

Интенсивность водной миграции и концентрации элементов. Для характеристики водной миграции привлечены данные о содержании химических элементов в водах, коэффициенты водной миграции (K_x) и ее контрастности (K_c). Наряду с компонентами основного солевого состава вод рассмотрены элементы, характерные для андезитобазальтовой тефры: Si, Ti, V, а также некоторые тяже-

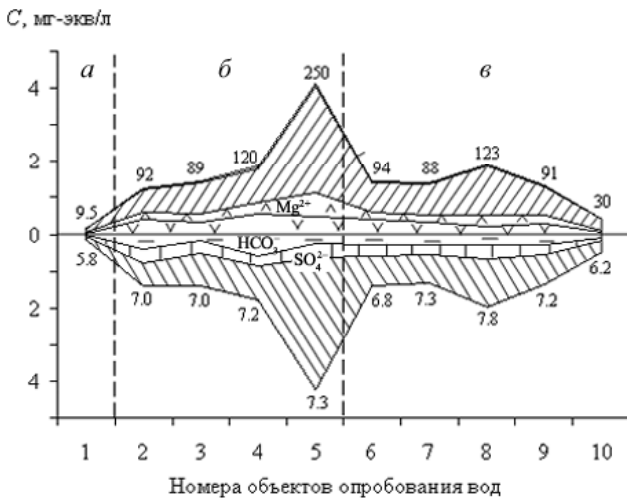


Рис. 1. Ионный состав (С), минерализация (М, мг/л, цифры над графиком) и величина рН (цифры под графиком) разных типов вод о. Матуа: а – снеговые и талые воды; б – родники и ручьи в зонах разгрузки грунтовых вод лавовых плато и высоких морских террас; в – родники, ручьи и озера низких морских террас. Номера объектов опробования вод даны в соответствии с табл. 1

Fig. 1. Ionic composition (C), mineralization (M, mg/l, figures above the diagram), and pH value (figures under the diagram) of different water types of the Matua Island: а – snow and melt waters; б – springs and streams in groundwater discharge zones of lava plateau and high coastal terraces; в – springs, streams and lakes of low coastal terraces. Numbers of water sampling objects are given according to Table 1

лые металлы (Fe, Mn) и биогенные элементы (P). Ряды водной миграции отражают различную интенсивность вовлечения элементов в подземный и поверхностный стоки и возможность накопления в замкнутых водоемах (табл. 2).

К числу очень подвижных мигрантов в водах ручьев относятся Cl и S, хотя абсолютные значения K_x для этих циклических элементов, поступающих аэральным путем, могут быть завышены из-за приокеанического положения вулканического о. Матуа. Увеличение K_x для Cl и Na в озерах заболоченных западин свидетельствует о накоплении там элементов с высокой миграционной способностью (значения K_c по отношению к ручьям составляют 1,3 для Cl и 1,5 для Na). В группу легкоподвижных элементов входят Na, K, Mg и Ca; подвижных, слабоподвижных и инертных – Si, P, V, Ti, Mn и Fe. Их положение в рядах водной миграции соответствует данным о том, что вынос из пепла Na и Mg более интенсивный по сравнению с выщелачиванием Fe, Mn, Ti и V [Гущенко, 1965].

Среди анионогенных элементов, связанных с литогенной основой, по контрастности миграции резко различаются Si и P. Для Si и $P_{мин}$ характерны повышенные концентрации в водах родников и ручьев в зонах разгрузки грунтовых вод лавовых плато и высоких террас (рис. 2). О роли пирокластического субстрата в вовлечении этих элементов в миграцию свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции концентрации Si с содержанием Ca и гидрокарбонатов (0,94 и 0,91), а также с содержанием $P_{мин}$ (0,79). Несмотря на общий тренд к уменьшению концентрации Si в родниках, ручьях и озерах низких террас, контрастность его водной миграции невелика (K_x от 0,7 до 0,4), а степень подвижности снижается только в озерах ($K_x = 0,03$). Возможно, минимальное содержание Si в озерах связано с его перехватом на фитобарьере в супераквальных болотных элементарных ландшафтах, где доминируют концентраторы этого элемента. Высокая контрастность водной миграции P ($K_x = 0,2-0,5$ в ручьях, 2,6 в озе-

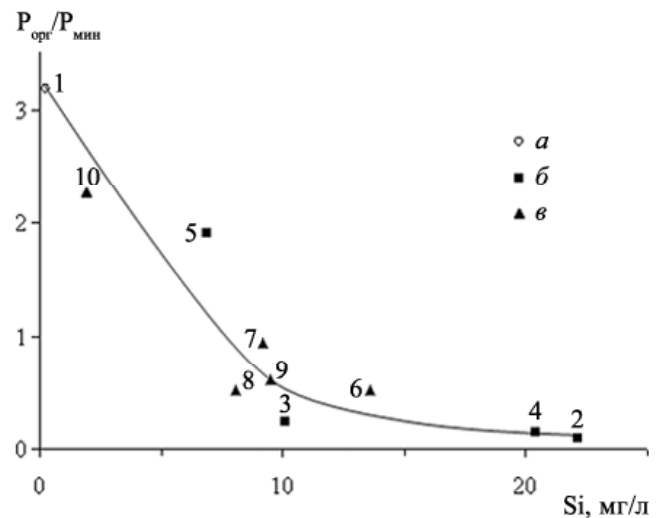


Рис. 2. Соотношение растворенных форм органического и минерального фосфора и содержание растворенного кремния в разных типах вод о. Матуа: а – снеговые и талые воды; б – родники и ручьи в зонах разгрузки грунтовых вод лавовых плато и высоких морских террас; в – родники, ручьи и озера низких морских террас. Подписи к значкам – номера объектов опробования вод в соответствии с табл. 1

Fig. 2. Ratio of dissolved forms of organic and mineral phosphorus and the content of dissolved silicon in different water types of the Matua Island: а – snow and melt waters; б – springs and streams in groundwater discharge zones of lava plateau and high coastal terraces; в – springs, streams and lakes of low coastal terraces. Captions to points are numbers of water sampling objects according to Table 1

Таблица 2

Ряды водной миграции химических элементов в ручьях и озерах о. Матуа

Тип вод	Коэффициент водной миграции (K_x)						
	1000n	100n	10n	n	0,n	0,0n	0,00n
Ручьи у тылового шва высоких террас	Cl	–	S	Na, K, Ca, Mg	Si, P, V	Ti	Mn, Fe
Ручьи низких морских террас	Cl	S	–	Na, K, Mg, Ca	Si, P, Mn	V, Fe, Ti	–
Озера заболоченных западин	Cl	–	S, Na	K, P	Mg, Ca, V, Mn, Fe	Ti, Si	–

рах; K_c от 4 до 13) связана с накоплением его органической формы в водах озер (до 37,5 мкг/л) при уменьшении доли минеральной составляющей (1,5–3,9 мкг/л). Это свидетельствует о роли биологического круговорота в создании предпосылок появления в заболоченных понижениях геохимических ловушек для растворимых форм биогенных элементов.

Значительная вариабельность концентраций в водах Fe и Mn ($C_v > 70$) связана с обеднением этими элементами большинства родников (Fe = 4,1–14 мкг/л, Mn = 0,5–3,8 мкг/л) и резким увеличением их концентраций в ручьях и озерах низких террас: Fe = 60–137 мкг/л, Mn = 9,0–14 мкг/л (рис. 3). Возрастанию подвижности элементов (K_c для Fe достигает 100, для Mn – 40) способствует изменение окислительно-восстановительной обстановки и развитие оглеения в суффозионной ложбине и по днищам ручьев. В то же время на локальных участках наблюдаются скопления гидроксидов железа, свидетельствующие о функционировании кислородного барьера. Также нельзя исключить, что одной из причин повышенных концентраций растворенного Fe может быть существование специфического техногенного источника, связанного с остатками оборудования в бelligеративных комплексах террас.

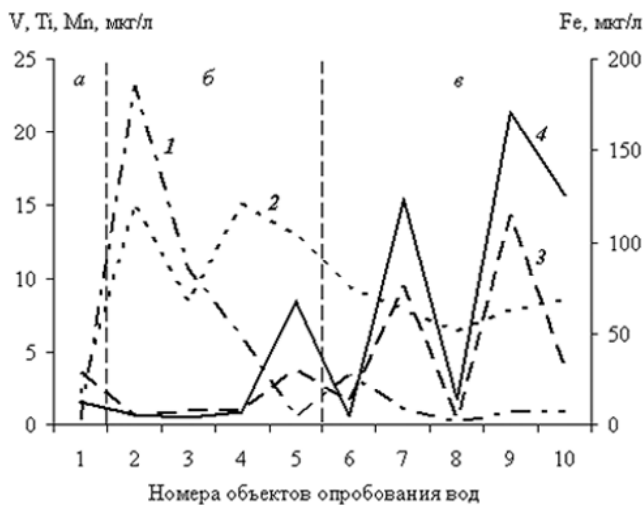


Рис. 3. Содержание растворенных форм ванадия (1), титана (2), марганца (3) и железа (4) в разных типах вод о. Матуа. а – снеговые и талые воды; б – родники и ручьи в зонах разгрузки грунтовых вод лавовых плато и высоких морских террас; в – родники, ручьи и озера низких морских террас. Номера объектов опробования вод даны в соответствии с табл. 1

Fig. 3. The content of dissolved forms of vanadium (1), titanium (2), manganese (3), and iron (4) in different water types of the Matua Island: (a) snow and melt waters; (b) springs and streams in groundwater discharge zones of lava plateau and high coastal terraces; (c) springs, streams, and lakes of low coastal terraces. Numbers of water sampling objects are given according to Table 1

Пространственное распределение V и Ti противоположно таковому для Fe и Mn и имеет сходство с распределением Si и $P_{\text{мин}}$, концентрации которых уменьшаются в водах родников и ручьев низких террас. Однако эти элементы отличаются слабой подвижностью и сохраняют свое положение в рядах водной миграции при незначительном уменьшении K_x (0,01–0,08 для Ti и 0,04–0,3 для V). Их поведение обусловлено слабым выносом из пирокластического чехла и, возможно, отсутствием других источников для включения в водную миграцию.

Выводы:

– макро- и микроэлементный состав поверхностных водотоков отличается высокой вариабельностью и меняется в зависимости от локализации зон разгрузки подземных вод на контакте древних вулканических построек и морских террас разного уровня. На низких террасах влияние родников на состав вод ручьев в период снеготаяния уменьшается, но усиливается уже в начале вегетационного периода, определяя различия состава поверхностных вод в разных частях острова;

– по сравнению с составом атмосферных осадков при формировании инфильтрационных вод роль пирокластического чехла проявляется в повышении минерализации, доли Ca и гидрокарбонатов, увеличении содержания Si и $P_{\text{мин}}$, а также концентрации V и Ti, которые входят в парагенную ассоциацию микроэлементов, накапливающихся в тefре;

– по контрастности водной миграции выделяются тяжелые металлы – Fe и Mn, подвижность которых увеличивается в ручьях, дренирующих заболоченные участки морских террас. В качестве аккумуляторов их растворимых форм выступают озера в суффозионной ложбине, играющие роль геохимических ловушек для биогенных элементов. К их числу относится $P_{\text{орг}}$, содержание которого увеличивается в результате биогенеза и превышает минеральную составляющую, что отличает воды ручьев и озер от родников. При соседстве супераквальных болотных и аквальных элементарных ландшафтов противоречивость воздействия биогенеза на химический состав вод состоит в том, что он способствует аккумуляции одних компонентов (Fe, Mn, $P_{\text{орг}}$), но в условиях замедленного биологического круговорота вызывает сокращение активности водной миграции других (Ca, Mg);

– влияние морских вод и связанное с ними обогащение речных вод талассофильными элементами ограничено и зафиксировано лишь в нижнем течении ручьев, находящихся в зоне штормовых нагонов. По сравнению с верховьями такие участки выделяются по появлению слабощелочных условий среды и увеличению минерализации вод.

Благодарности. Исследования поддержаны грантом Русского географического общества № 02/2017-Р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Гребенникова Т.А.* Экологическое состояние водоемов острова Матуа (Средние Курилы) по данным диатомового анализа // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 126–132.
- Гущенко И.И.* Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М.: Наука, 1965. 144 с.
- Детерев А.В.* Петрохимические особенности продуктов современных извержений вулкана Пик Сарычева, остров Матуа (Курилы) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 94–99.
- Детерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В., Разжигаева Н.Г.* Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курилы): геохимия тefры // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 16–26.
- Жарков Р.В., Побережная Т.М.* Влияние сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов на компоненты ландшафтов (влк. Менделеева, о-в Кунашир, Курильские о-ва) // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 53–58.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Генетические и геохимические особенности почв Камчатки. М.: Наука, 2011. 245 с.
- Иванов А.Н.* Остров Матуа: активный вулкан и военная база // Природа. 2017. № 2. С. 18–26.
- Иванов А.Н., Авессаломова И.А.* Ландшафтно-геохимические особенности орнитогенных геосистем Ямских островов (Охотское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 2. С. 35–42.
- Козлов Д.Н., Жарков Р.В.* Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головина и Заварицкого (Курильские острова) // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 103–106.
- Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2008 г. (III этап) // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 2. С. 134–142.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В.* Состояние вулкана Эбеко (о-в Парамушир) и влияние его активизации на экологическую обстановку // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 51–58.
- Лобкина В.А., Казакова Е.Н.* Миграция химических элементов из морской воды и их последующая аккумуляция в снежном покрове (юг острова Сахалин) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 101–105.
- Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Гребенникова Т.А., Арсланов Х.А., Пиеничкова Н.Ф., Рыбин А.В.* Роль климатического и вулканического факторов в формировании органогенных отложений и развитии ландшафтов о. Симушир (Центральные Курилы) в среднем–позднем голоцене // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 55–67.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А., Копотева Т.А., Рыбин А.В.* Развитие озерно-болотных обстановок осадконакопления древней кальдеры острова Расшуа (Центральные Курилы) в голоцене // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 4. С. 74–86.
- Ретеюм А.Ю.* Земные миры. М.: Мысль, 1988. 266 с.
- Рычагов С.Н., Королева Г.П., Степанов И.И.* Рудные элементы в зоне гипергенеза месторождения парогидротерм: распределение, формы миграции, источники // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 37–58.
- Рычагов С.Н., Пушкарев В.Г., Белоусов В.И., Кузьмин Д.Ю., Мушинский А.В., Сандимирова Е.И., Бойкова И.А., Шульга О.В., Николаева А.Г., Егорова Н.П.* Северо-Курильское гидротермальное месторождение: геологическое строение и перспективы использования // Вулканология и сейсмология. 2004. № 2. С. 56–72.
- Торохов П.В., Черткова Л.В.* Водные массы кальдеры Львиная Пасть и их газогидрохимические особенности // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 51–68.
- Чудаев О.В., Чудаева В.А.* Состав и генезис гидротермальных систем областей современного островодужного вулканизма // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 24–29.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.

Поступила в редакцию 27.04.2017
Принята к публикации 13.09.2017

I.A. Avessalomova¹, A.N. Ivanov², A.V. Savenko³

WATER MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE LANDSCAPES
OF VOLCANIC ISLANDS OF THE CENTRAL KURILES
(CASE STUDY OF THE MATUA ISLAND)

The basic characteristics of atmospheric, ground, and surface waters in the contact zone of volcanic structures and coastal terraces are revealed according to hydrochemical sampling data for the Matua Island (the Central Kuriles). The distinctions in pH value, mineralization and the content of major ions, nutrients (Si, P), and iron-group trace elements (Ti, V, Mn, Fe) are noted. Values of Ca, Mg, Si, P_{min}, V, and Ti are suggested as indicators for revealing the role of lithogenic factor in the formation of infiltration waters. It is shown that the concentrations of dissolved forms of these elements vary depending on the location of groundwater discharge zones and decrease in the waters of low coastal terraces. Various mobility and contrast of chemical elements behavior are established using the water migration coefficients, as well as possible accumulation of Fe, Mn, and P_{org} in streams and lakes in the vicinity of hydromorphic bog landscapes.

Key words: Central Kuriles, the Matua Island, volcanic structures, coastal terraces, tephra, chemical composition of water, intensity of water migration.

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Geographical Society (project № 02/2017-P).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail:* aiageo@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail:* a.n.ivanov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geochemistry, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* alla_savenko@rambler.ru

REFERENCES

- Chudaev O.V., Chudaeva V.A.* Sostav i genezis gidrotermal'nyh sistem oblastej sovremennogo ostrovoduzhnogo vulkanizma [Structure and genesis of hydrothermal systems of the modern arc volcanism areas] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2009. № 4. P. 24–29 (in Russian).
- Degterev A.V.* Petrohimicheskie osobennosti produktov sovremennyh izverzenij vulkana Pik Sarycheva, ostrov Matua (Kurily) [Petrochemical features of modern eruptions products of the Sarychev Peak volcano, the Matua Island (the Kuriles)] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2011. № 6. P. 94–99 (in Russian).
- Degterev A.V., Rybin A.V., Melekestsev I.V., Razzhigaeva N.G.* Explosive eruptions of the Sarychev Peak volcano in the Holocene on Matua Island, the Central Kuriles: The tephra geochemistry // J. Pacific Geology. 2012. V. 31. № 6. P. 423–432 (in Russian).
- Grebennikova T.A.* Ekologicheskoe sostoyanie vodoemov ostrova Matua (Srednie Kurily) po dannym diatomovogo analiza [Ecological state of reservoirs of the Matua Island (the Central Kuriles) according to the diatom analysis] // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2016. № 4. P. 126–132 (in Russian).
- Guschenko I.I.* Peply Severnoj Kamchatki i usloviya ih obrazovaniya [Ashes of the Northern Kamchatka and condition of their formation]. M.: Nauka, 1965. 144 p. (in Russian).
- Ivanov A.N.* Ostrov Matua: aktivnyj vulkan i voennaya baza [Matua Island: active volcano and the military base] // Priroda. 2017. № 2. P. 18–26 (in Russian).
- Ivanov A.N., Avessalomova I.A.* Landshaftno-geohimicheskie osobennosti ornitogennyh geosistem Yamskih ostrovov (Ohotskoe more) [Landscape-geochemical features of ornithogenic geosystems of the Yamskie Islands (the Sea of Okhotsk)] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya. 2008. № 2. P. 35–42 (in Russian).
- Kompleksnaya ekspeditsiya na Kuril'skie ostrova v 2008 g. (III etap) [Complex expedition on the Kuril Islands in 2008 (stage III)] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2009. № 2. P. 134–142 (in Russian).
- Kotenko T.A., Kotenko L.V.* Sostoyanie vulkana Ebeko (o-v Paramushir) i vliyaniye ego aktivizatsii na ekologicheskuyu obstanovku [State of the Ebeko volcano (the Paramushir Island) and influence of its activation on the ecological situation] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2010. № 3. P. 51–58 (in Russian).
- Kozlov D.N., Zharkov R.V.* Morfologiya i genezis ozer kal'dernykh kompleksov Golovina i Zavarickogo (Kuril'skie ostrova) [Morphology and genesis of lakes of the Golovin and Zavaritzky caldera complexes (the Kuril Islands)] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2010. № 3. P. 103–106 (in Russian).
- Lobkina V.A., Kazakova E.N.* Migratsiya himicheskikh elementov iz morskoy vody i ih posleduyuschaya akkumulyatsiya v snezhnom pokrove (yug ostrova Sahalin) [Migration of chemical elements from seawater and their subsequent accumulation in snow cover (south of the Sakhalin Island)] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2011. № 6. P. 101–105 (in Russian).
- Perel'man A.I.* Geohimiya [Geochemistry]. M.: Vysshaya shkola, 1989. 528 p. (in Russian).
- Razzhigaeva N.G., Ganzei L.A., Belyanina N.I., Grebennikova T.A., Arslanov K.A., Pshenichnikova N.F., Rybin A.V.* Role of climatic and volcanogenic factors in the formation of organogenic sediments and development of landscapes on the Simushir Island (Central Kurile Islands) in the middle-late Holocene // J. Pacific Geology. 2013. V. 7. № 3. P. 199–211 (in Russian).
- Razzhigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Mikhova L.M., Arslanov K.A., Kopoteva T.A., Rybin A.V.* Development of lacustrine-boggy sedimentary environments in the ancient Rasshua Island caldera (Central Kuril Islands) in the Holocene // J. Pacific Geology. 2012. V. 6. № 4. P. 326–338 (in Russian).
- Reteyum A.Yu.* Zemnye miry [The Earth's worlds]. M.: Mysl', 1988. 266 p. (in Russian).
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Rychagov S.N., Koroleva G.P., Stepanov I.I.* Rudnye elementy v zone gipergeneza mestorozhdeniya parogidroterm: raspredelenie, formy migratsii, istochniki [Ore elements in the hypergenesis zone of steam hydrothermae field: distribution, forms of migration, sources] // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2002. № 2. P. 37–58 (in Russian).
- Rychagov S.N., Pushkarev V.G., Belousov V.I., Kuz'min D.Yu., Mushinskij A.V., Sandimirova E.I., Bojkova I.A., Shul'ga O.V., Nikolaeva A.G., Egorova N.P.* Severo-Kuril'skoe gidrotermal'noe mestorozhdenie: geologicheskoe stroenie i perspektivy ispol'zovaniya [North-Kurile hydrothermal field: geological structure and prospects of utilization] // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2004. № 2. P. 56–72 (in Russian).
- Torohov P.V., Chertkova L.V.* Vodnye massy kal'dery L'vinaya Past' i ih gazogidrohimiicheskie osobennosti [Water masses of Lion's Mouth caldera and their gas-hydrochemical features] // Vulkanologiya i sejsmologiya. 1990. № 5. P. 51–68 (in Russian).
- Vinogradov A.P.* Srednee sodержaniye himicheskikh elementov v glavnykh tipah izverzhennykh gornyx porod zemnoj kory [Average concentrations of chemical elements in the main types of effusive rocks of the Earth's crust] // Geohimiya. 1962. № 7. P. 555–571 (in Russian).
- Zaharihina L.V., Litvinenko Yu.S.* Geneticheskie i geohimicheskie osobennosti pochv Kamchatki [Genetic and geochemical features of soils of the Kamchatka Peninsula]. M.: Nauka, 2011. 245 p. (in Russian).
- Zharkov R.V., Poberezhnaya T.M.* Vliyaniye sol'fatarnogidrotermal'noj deyatel'nosti vulkanov na komponenty landshaftov (vkl. Mendeleeva, o-v Kunashir, Kuril'skie o-va) [Influence of solfataric-hydrothermal activity of volcanoes on the components of landscapes (Mendeleyev volcano, the Kunashir Island, the Kuriles)] // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2008. № 1. P. 53–58 (in Russian).

Received 27.04.2017

Accepted 13.09.2017