
РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 550.4

**КАСКАДНЫЕ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ
(НА ПРИМЕРЕ о. МАТУА, ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ)**

И.А. Авессаломова¹, А.Н. Иванов²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения*

¹ *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: aiageo@yandex.ru*

² *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru*

Анализируются возможности использования концепции каскадных ландшафтно-геохимических систем (КЛГС) применительно к островам с активными вулканами. Объектом исследования является о. Матуа с вулканом Сарычева, который считается наиболее активным на Курилах. В структуре КЛГС острова выделено три высотных яруса, различающихся по морфолитогенной основе, характеру экзогенных процессов, растительности и условиям миграции элементов. Установлено, что основными латеральными потоками, связывающими все ярусы, выступает гравигенное перемещение тефры, подземный сток с разгрузкой в нижнем ярусе на контакте морских террас, а также вулканические сели. Характерно почти полное отсутствие поверхностного стока, связанное с высокой водопроницаемостью почвенно-пирокластического чехла, и, как следствие, отсутствие типичных катен, связанных с жидким стоком. Показано, что для вулканической КЛГС характерно импульсное функционирование и разные виды латеральных потоков во время извержения и между ними. В период активизации вулкана преобладают аэральные и гравигенные потоки (выпадение тефры и связанные с этим пирокластические потоки и волны, лавовые потоки, газовые эмиссии, лахары), определяющие включение твердого вещества в механическую миграцию. Они связывают геохимические ландшафты всех ярусов – верхнего, среднего и нижнего – и достигают прилегающей акватории. В периоды между извержениями увеличивается роль современных экзогенных процессов (лавинные, селевые, обвально-осыпные и др.) и подземных вод в зонах их разгрузки, а также закладываются новые латеральные связи внутри островной КЛГС. Характерным структурным элементом КЛГС всех вулканических островов является береговая зона, особенности структурно-функциональной организации которой определяются разнонаправленными потоками вещества с разным химическим составом от вулканического ядра и со стороны океана, что обуславливает гетерогенную и мозаичную ландшафтно-геохимическую структуру.

Ключевые слова: остров, вулкан, геохимическая структура, катены, латеральные потоки

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.8

ВВЕДЕНИЕ

Острова с активными вулканами имеют ограниченное распространение на территории России и с ландшафтно-геохимических позиций изучены недостаточно. Сложность организации и эволюции вулканических ландшафтов требует выбора и совместного использования нескольких методологических подходов, раскрывающих разные стороны их формирования, структуры и функционирования. Одним из них является концепция нуклеарных геосистем, своеобразие которых определяется наличием центрального ядра и окружающей его оболочки [Ретеюм, 1988]. Такой подход базируется

на выделении активного, обладающего эндогенным потенциалом вулканического очага (эруптивный центр) и географических полей, возникающих в сфере его влияния. Оно осуществляется благодаря потокам вещества, возникающим при извержениях (лавовые потоки, выбросы тефры, газовые эмиссии и др.). Изменения вещественного состава и литогеохимической специализации изверженных пород (дациты, андезиты, андезибазальты, базальты) проявляются в соответствии с этапами эволюции эруптивных центров, перестройкой и различной продуктивностью магмогенерирующих систем.

Наиболее сложная пространственная дифференциация ландшафтов наблюдается в двойных вулканах типа Сомма-Везувий (вулкан в вулкане). Для их истории в плейстоцене – голоцене характерно несколько этапов: эруптивная деятельность древнего вулкана → кальдерообразование → возникновение и функционирование молодого вулканического конуса, вложенного в первоначальную разрушенную структуру. Появление этого эруптивного центра сопровождается формированием новых вулканических образований, причем поле его воздействия может частично перекрывать более древние постройки. Соседство и наложение полей разных ядер способствует усложнению ландшафтной организации вулканических районов, ее полиструктурности и метахронности.

Центробежный характер движения вещества при извержениях вулканов (от ядра к периферии) предопределяет важную роль однонаправленных латеральных потоков, объединяющих в единую систему ландшафты, занимающие разные высотные ярусы и меняющиеся в соответствии с гипсометрическими градиентами. Такие цепочки сопряженных природных комплексов образуют каскадные системы, выделенные Р. Чорли и Б. Кеннеди и предполагающие ведущую роль входных и выходных потоков в их организации [Chorley, Kennedy, 1971]. В геохимической интерпретации к этому типу относятся каскадные ландшафтно-геохимические системы (КЛГС), в которых, по М.А. Глазовской [2007], происходит гравитационное перемещение водных и твердых масс от более высоких уровней к более низким. Для их структуры характерно формирование разобщенных зон мобилизации вещества, транзита и аккумуляции. Изучение латерально-миграционной сопряженности каскадных систем, как одного из стержневых направлений современной геохимии ландшафтов, раскрывает роль потоков вещества в их организации [Касимов, 2002]. В соответствии с этой концепцией различаются КЛГС разной сложности – от наиболее просто организованных геохимических сопряжений (катен) до речных бассейнов разных порядков и их объединений в ландшафтно-геохимические арены с единым водосборным бассейном.

В противоположность аренам существуют КЛГС рассеяния концентрической формы, когда при едином источнике поступления вещества водные и гравитационные потоки рассредоточиваются и не имеют общей зоны аккумуляции. Такая ситуация складывается, когда в результате деятельности индивидуальных, изолированных друг от друга КЛГС отмечается перенос вещества в разных направлениях от кратера и формирование своеобразных «ореолов рассеяния». Подобная дифференциация потоков увеличивает гетерогенность разновозрастных гео-

графических полей. В то же время при сравнении КЛГС разных типов принципиальное значение имеет определение мест конечной аккумуляции вещества, переносимого миграционными потоками. Степень замкнутости КЛГС зависит от возможности задержки и накопления масс в различных звеньях геохимических сопряжений, тогда как в открытых КЛГС поток мигрантов достигает морей и океанов. С этой точки зрения к числу открытых КЛГС региональной размерности могут быть отнесены вулканические острова, где потоки вещества достигают береговой полосы и формируют КЛГС «вулканический остров – океан». Ее особенность заключается в том, что на формирование ландшафтной структуры оказывают влияние не только потоки вещества от вулканического ядра, но и со стороны океана. Эта полоса является ландшафтным экотопом на контакте наземных вулканических и подводных ландшафтов.

В КЛГС вулканических островов латеральная миграция элементов осуществляется с однонаправленными гравитационными, водными (с поверхностными и подземными водами) и аэральными потоками. В соответствии с их характером появляются КЛГС разных видов. К одному из них относятся КЛГС, когда связи между зонами мобилизации, транзита и аккумуляции обеспечиваются площадными латеральными потоками («палящие тучи», газовые эмиссии вулкана и др.). Второй вид КЛГС связан с линейными абиотическими потоками (лавовые потоки, лахары, движение снежных масс по лавинным лоткам и др.). Такие векторные КЛГС являются важным механизмом, отвечающим за дальность передачи в пространстве импульса воздействия ядра. В вулканах типа Сомма-Везувий их функционирование обеспечивает связь между молодыми и древними вулканическими постройками. При характеристике строения, функционирования и активности векторных КЛГС необходим учет ведущего процесса, стимулирующего их возникновение; характера вещественного состава системообразующего потока и объем массопереноса; режима воздействия (постоянное сезонное и др.); степень открытости; эффектов катастрофического проявления.

При ландшафтных исследованиях вулканических районов обычно применяется классический структурно-генетический подход с составлением ландшафтных карт. Геохимические исследования вулканов чаще всего связаны с определением химического состава изверженных пород на разных стадиях развития. Известны также исследования, в которых оцениваются отдельные вещественно-энергетические потоки в вулканических системах, связанные преимущественно с миграцией химических элементов в гидротермальных системах и в потоках вулканических газов. В работах россий-

ских ученых в качестве объектов исследования выступают преимущественно активные вулканы Курильских островов и Камчатки [Калачева и др., 2021, 2022; Таран и др., 1995]. В частности, оценен химический состав, потоки растворенных веществ и тепловыделение в кальдере вулкана Головина на о. Кунашир, гидротермальный сток Cl и S из оз. Кипящего (7,8 и 11,6 т/сут. соответственно), а также общий диффузный вынос диоксида углерода с поверхности озера [Kalacheva et al., 2017]. Предложена систематика изотопного состава воды и содержания хлора в вулканических газах островных дуг на примере 26 изученных вулканов в зонах субдукции [Taran, Zelenski, 2014]. Для Курильских островов в целом установлен состав высокотемпературных газов в кратерах разных вулканов, химический состав основных водотоков, дренирующих термальные источники, и их роль в миграционных процессах элементов [Taran et al., 2018].

В зарубежной научной литературе подход на основе концепции КЛГС применительно к вулканам не получил распространение. Большинство работ, касающихся вещественно-энергетических потоков, связано с разработкой геохимических моделей гидротермальных систем и потоков вулканических газов [Aguilera et al., 2012; Fischer, 2008; Jagard, 2003; Straub, Layne, 2003]. В целом использование концепции КЛГС применительно к действующим вулканам и анализ процессов миграции химических элементов по звеньям ландшафтных катен в научной литературе почти не отражены. Цель настоящего исследования – установление структурно-функциональной организации КЛГС вулканического острова. Решаемые задачи: 1) сопоставление роли ведущих латеральных потоков в формировании КЛГС в разные периоды вулканической активности; 2) анализ репрезентативных вариантов катен, типичных для отдельных высотных ярусов острова; 3) выявление современных процессов, ответственных за возникновение замкнутых и открытых островных КЛГС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований – о. Матуа (площадь 52 км²), расположенный в средней части Курильской островной дуги. На острове находится один из самых активных современных Курильских вулканов – Пик Сарычева (высота 1446 м) [Рыбин и др., 2012]. В историческое время эксплозивное извержение вулкана впервые было зафиксировано в 1760 г. Известны также взрывные извержения 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976 гг., а также более спокойные проявления вулканической деятельности в 1878–1879, 1954 и других годах. В XXI в. наблюдается активизация вулкана (извержения в 2009, 2018

и 2020–2021 гг.), причем в 2009 г. эруптивная колонна поднималась на высоту до 16 км [Дегтерев и др., 2012]. Извержения на современном этапе развития вулкана имеют эксплозивный и эксплозивно-эффузивный характер. 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 условиях умеренного морского климата с аномально холодным для 48° с. ш. летом (+5...+11°C) господствуют бореально-субарктические геохимические ландшафты с разным типом биологического круговорота (примитивно-пустынные, тундровые, стланиковые и луговые).

В пределах генетически единого островного вулканического ландшафта регионального уровня выделяются три географические местности, различающиеся по морфолитогенной основе и отражающие как сложную историю развития стратовулкана типа Сомма-Везувий, так и влияние океана: а) современных вулканических построек вулкана Пик Сарычева; б) древних вулканических построек вулкана Матуа; в) разновысотных морских террас [Иванов, 2017]. Они приурочены к разным высотным ярусам, что оказывает влияние на формирование и функционирование КЛГС разного уровня организации. Сопоставление ландшафтно-геохимических ярусов имеет принципиальное значение. Оно выявляет их различия по морфолитогенной основе, типам рельефа, геохимической специализации пород, набору и интенсивности экзогенных процессов, характеру растительности и обстановкам водной миграции элементов. В совокупности эти факторы определяют предпосылки возникновения латеральных миграционных потоков.

В основу статьи положены полевые исследования на о. Матуа летом 2016–2017 гг. При анализе химического состава тефры и лав использованы литературные данные [Дегтерев и др., 2012], на их основании определены средние содержания макро- и микроэлементов; их кларки концентрации (КК) по отношению к кларкам литосферы (по А.П. Виноградову); составлены формулы накопления, отражающие парагенные ассоциации элементов с КК > 1. Гидрохимическое опробование включало отбор проб (24 точки) из разных типов водных объектов (снег, лед, родники, ручьи и озера), расположенных во всех трех ярусах КЛГС. Анализ вод проводился по общепринятым методикам. При расчете коэффициентов водной миграции элементов использовалось их содержание в позднеголоценовой тефре [Авессаломова и др., 2018]. Различия типов вод выявлялись по формулам Курлова, включающим минерализацию (в г/л) и ионы, составляющие не ме-

нее 5%-экв. Для характеристики биогеохимических особенностей ландшафтов проведено опробование почв и растений на опорных профилях, заложенных в соответствии со структурой катен. Определение микроэлементного состава зол растений (166 проб) и почв (69 проб) проведено методом приближенного количественного спектрального анализа; содержания в почвах (20 проб) макроэлементов и тяжелых металлов (Ni, Co, V, Cr и др.) методом рентгено-флуоресцентного анализа. При обработке аналитических данных рассчитаны КК элементов в почвах и коэффициенты биологического поглощения (Ах) для растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выявление структуры и функционирования КЛГС о. Матуа показало специфические особенности организации таких систем на островах с активными вулканами. В отличие от «классических» КЛГС гумидных районов, объединенных водными связями (ландшафтно-геохимические арены и др.), на вулканических островах в их функционировании ведущая роль принадлежит механической миграции. Другая особенность связана с принципиальным изменением их пространственной организации во время извержений и между ними, что проявляется в различии и соотношении латеральных миграционных потоков (рис. 1). В период активизации вулкана преобладают аэральные и гравигенные потоки (площадные и линейные), определяющие включение твердого вещества в механическую миграцию. В периоды между извержениями увеличивается роль экзогенных процессов, в их активизации наряду с гравигенными принимают участие водные потоки, и закладываются новые латеральные связи внутри островной КЛГС.

Периоды извержений. С начала XX в. извержения вулкана Пик Сарычева происходили с различной периодичностью и продолжались от нескольких дней до нескольких месяцев. В такие периоды в КЛГС активизируются латеральные потоки, связывающие ландшафты верхнего, среднего и нижнего ярусов. Выраженность потоков и характер влияния зависят от силы и продолжительности извержений. В одних случаях они захватывали значительные площади на конусе вулкана и в кальдере вулкана Матуа (выпадение тефры); в других имели линейную направленность (лавовые потоки, лахары), проходили через все ярусы КЛГС, достигали морских террас и акватории океана.

Главная особенность современных извержений вулкана Пик Сарычева – высокая эксплозивность, когда выбрасываемый обломочный материал фор-

мирует «палящие тучи» и ассоциированные с ними пирокластические потоки и волны. После обрушения эруптивной колонны во время извержения 2009 г. склоны острова были перекрыты плащом пирокластических отложений температурой около 500°C [Рыбин и др., 2012] и мощностью до 20 м в трансаккумулятивных позициях. Лавовые потоки андезибазальтового состава на современном этапе развития вулкана имеют подчиненное значение и, как правило, не выходят за пределы верхнего яруса КЛГС. Практически все они были локализованы в западном и северном секторах вулкана, достигали длины 2–3 км при ширине 100–250 м. Другая разновидность линейных латеральных потоков – лахары. Основная зона их питания находится в верхнем ярусе, где накапливаются рыхлые слабо консолидированные пирокластические отложения. Лахары образуются при быстром таянии снега на склонах вулкана, захватывают пирокластический материал, переносят его в средний и нижний ярусы островной КЛГС.

Периоды между извержениями. При выявлении организации КЛГС о. Матуа в спокойные периоды в основу положен анализ катенарной структуры ландшафтов разных высотных ярусов и их роли при возникновении каскадных систем более высокого ранга с учетом деятельности латеральных потоков, определяющих связи в КЛГС.

Верхний ярус. Абиогенные и примитивно-пустынные ландшафты верхнего яруса приурочены к склонам современного вулканического конуса (рис. 2А).

Для их литогенной основы характерно переслаивание голоценовых лав и пирокластики, причем позднеголоценовые продукты последних исторических извержений имеют исключительно андезибазальтовый состав. Содержание SiO_2 в них составляет 52,3–55,9; CaO 8,8–9,5; K_2O 0,99–1,3 масс.%, что соответствует умеренно-калиевой известково-щелочной серии андезибазальтов [Дегтерев, 2011]. Расчет КК показал, что среди макроэлементов Са (КК = 2,22) занимает первое место и значительно опережает К (КК = 0,34), который относится к элементам рассеяния. Для определения микроэлементного состава использованы данные по позднеголоценовой тефре [Дегтерев и др., 2012]. Установлено, что в парагенную ассоциацию элементов накопления (КК > 1) входят V, Sc, Mn, Ti, Cu, Co, большинство которых специфично для основных пород. Все они вошли в формулу накопления для андезибазальтов. Различия в концентрации прослеживаются при сопоставлении состава вулканического гравия и лапиллей с тонким пеплом, в котором отмечен рост содержания V при снижении других микроэлементов (Cr, Ni, Zr, Ba, W и др.).

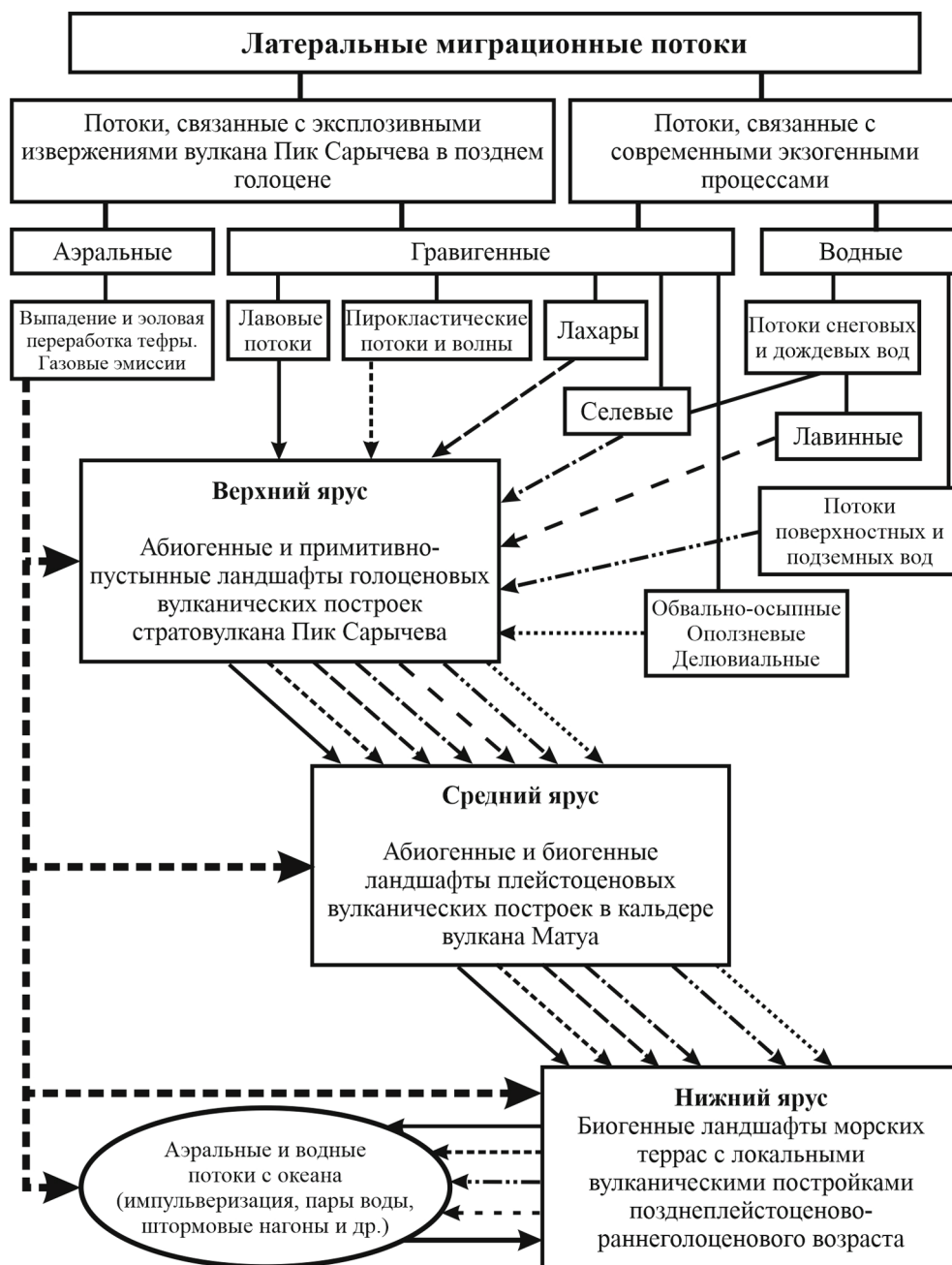


Рис. 1. Латеральные миграционные потоки в каскадных ландшафтно-геохимических системах о. Матуа

Fig. 1. Lateral migration flows in cascading landscape geochemical systems of the Matua Island

Типичные катены абиогенных ландшафтов верхнего яруса включают два рода элементарных ландшафтов (ЭЛ) – трансэлювиальные крутых склонов (Тэ) и трансаккумулятивные (Та). Их появление обусловлено медленным сползанием тефры и накоплением на пологих склонах. Такие гравигенные потоки имеют площадное распространение, отражают механическую миграцию и перераспределение твердого вещества в геохимических сопряжениях. При сходе снежного покрова в структуре катен периодически появляются трансаквальные ЭЛ (Аq'), связанные с ручейками талых вод. Это слабокислые (pH 5,7–5,8) хлоридно-натриевые ультрапресные воды (минера-

лизация от 3,0 мг/л). Переувлажнение грунта вдоль ручейков стимулирует появление своеобразных супераквальных ЭЛ, которые рассматриваются как геохимически автономные, так как они питаются атмосферными водами [Глазовская, 2002].

У нижней границы примитивно-пустынных ландшафтов появляются пионерные виды и небольшие травяные сообщества с проективным покрытием до 5–10%. Характерный представитель – пеннелиант кустарниковый (*Pennellianthus frutescens*), зольность которого 10,4–13,0%, а к элементам сильного накопления относятся Cu, Zn, Mn, Mo и др. Состав воды в ручейках на участках с травяной

растительностью меняется за счет увеличения минерализации (до 5,8 мг/л) и содержания основных ионов (Са с 0,1 до 0,4, Mg с 0,04 до 0,2 мг/л и др.).

Появление водных потоков играет принципиальную роль при формировании КЛГС, включающих несколько высотных ярусов, и проявляется в разных аспектах. С одной стороны, фильтрация атмосферных вод через пирокластические толщи способствует переносу водорастворимых соединений и пополнению запасов подземных вод, которые разгружаются на контакте вулканических построек и морских террас. С другой стороны, снеговые и дождевые воды – важный фактор формирования векторных КЛГС. Они связаны с однонаправленными линейными абиогенными потоками, возникающими при образовании лавин и селей. В лавинно-селевых бассейнах зона мобилизации вещества, вовлекаемого в миграцию, приурочена к трансаккумулятивному ЭЛ в катенах верхнего яруса. Это связывает их в единую каскадную систему, включающую зоны

транзита и аккумуляции на нижних гипсометрических уровнях. Более простые латеральные связи наблюдаются в КЛГС, когда транслокация между ярусами осуществляется благодаря обвально-осыпным процессам и камнепадам, поставляющим твердое вещество непосредственно к морю.

Средний ярус. Ландшафты среднего яруса сформировались в кальдере вулкана Матуа, характеризующейся сочетанием лавовых плато и древних лавовых потоков (андезиты, андезибазальты), разделенных долинообразными понижениями с крутыми склонами. Вулканические постройки частично перекрыты выбросами вулкана Пик Сарычева во время голоценовых извержений. Здесь происходила частичная аккумуляция тefры и проходит граница распространения отдельных языков пирокластических потоков. Средний ярус является преимущественно зоной транзита для лахаров, хотя их селевые конусы отмечаются в некоторых долинах.

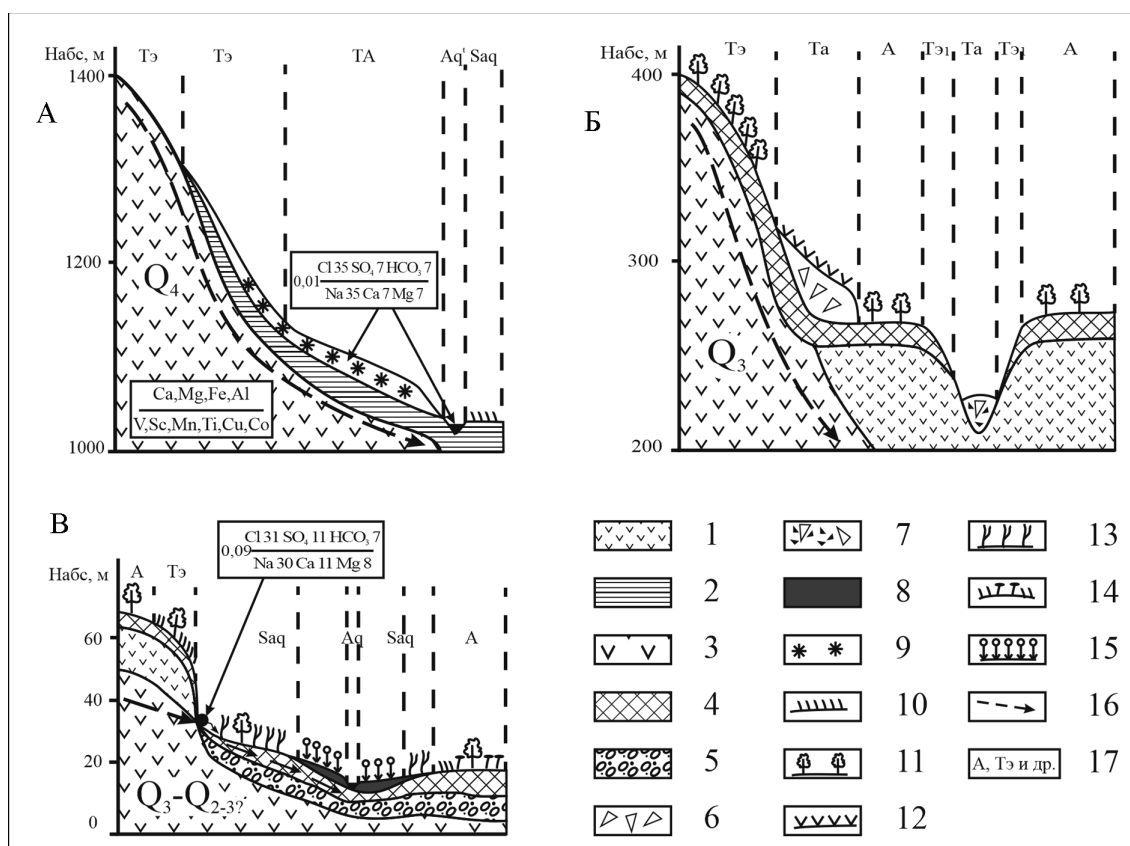


Рис. 2. Типичные катены верхнего (А), среднего (Б) и нижнего (В) ярусов: 1 – лавы; 2 – тefра; 3 – переслаивание лав и пирокластики; 4 – почвенно-пирокластический чехол; 5 – галечник; 6 – коллювий; 7 – селевые отложения; 8 – торф; 9 – снег; 10 – пионерные виды растений; 11 – ольховник; 12 – разнотравно-злаковые луга; 13 – злаково-высокотравные луга; 14 – луга с фрагментами тундры; 15 – осоковые низинные болота; 16 – подземные воды; 17 – индексы родов элементарных ландшафтов.

В прямоугольниках – формулы накопления и Курлова

Fig. 2. Typical catenae of the upper (A), middle (B) and lower (B) tiers:

1 – lava; 2 – tefra; 3 – alternation of lava and pyroclastics; 4 – soil-pyroclastic cover; 5 – pebble bed; 6 – colluvium; 7 – mudflow deposits; 8 – peat; 9 – snow; 10 – pioneer plant species; 11 – alder grove; 12 – forb-grass meadows; 13 – grass-high forb meadows; 14 – meadows with tundra fragments; 15 – sedge lowland bogsm; 16 – underground waters; 17 – index of the genera of elementary landscapes. In rectangles – the formulas of accumulation and Kurlov

В растительном покрове преобладают заросли ольхового стланика, но встречаются тундровые и луговые сообщества. Для литогенной основы ландшафтов характерно повсеместное наличие почвенно-пирокластического чехла (ППЧ). Это одно из принципиальных отличий ландшафтов среднего яруса от расположенных выше абиогенных ландшафтов. Оно отражает сложность их перестройки в периоды извержений и между ними, когда возрастает роль БИКа, процессов автотрофного и гетеротрофного биогенеза.

Сравнение содержаний элементов в толще ППЧ (на глубине до 90 см) и голоценовой тефре отражает сходство парагенных ассоциаций элементов. Однако зафиксировано накопление в современных и погребенных органогенных горизонтах почв биогенных элементов – Ca (КК 1,6–2,3), Mg (КК до 1,1), P (КК 1–3,2), Mn (КК 1–1,5), Cu (КК 1,1–2,7), Mo (КК до 1,3), что согласуется с их поглощением растениями в ольховом стланике, верещатниковых тундрах и лугах. В условиях кислого выщелачивания грубогумусные почвы являются дополнительным источником поступления в подземные воды элементов, в первую очередь катионогенных (Ca, Mg, Mn, Cu, Zn и др.).

В связи с отсутствием зон разгрузки подземных вод и хорошей дренированностью субстрата ландшафты среднего яруса практически лишены поверхностных водотоков, характеризуются доминированием неполных геохимических сопряжений и отсутствием супераквальных и аквальных ЭЛ. С учетом особенностей морфолитогенной основы выделяются два рода ландшафтов, отражающие соседство склонов древних вулканических построек с лавовыми плато (см. рис. 2Б). В катенах на склонах трансэлювиальные ЭЛ сочетаются с трансаккумулятивными (Тэ – Та), появление которых обусловлено гравигенными потоками. На первый план выходят обвальнo-осыпные процессы и связанные с ними шлейфы и конусы у подножия склонов. Их появление на контакте с лавовыми плато свидетельствует о возможности механического переноса материала между ландшафтами обоих родов, занимающих разные гипсометрические уровни.

Своеобразие катенарной структуры лавовых плато (А – Тэ – Та) связано с наличием долинообразных понижений, на днищах которых наблюдаются скопления рыхлого материала. Его происхождение связано с деятельностью селевых потоков в период снеготаяния и сильных дождей, а не с миграционными процессами на склонах плато. Сходная ситуация складывается и на расчлененных селевыми врезами склонах древних вулканических построек. Такие линейные эрозионные формы являются важными каналами перемещения однонаправленных грави-

генных потоков, обеспечивающих поступление вещества из ландшафтов верхнего уровня. В целом ландшафты среднего яруса могут рассматриваться как зона транзита и частичной аккумуляции вещества на днищах долин, что определяет их функциональную роль в структуре островной КЛГС.

Нижний ярус. В ландшафтах нижнего яруса осуществляются функции по конечной аккумуляции вещества из верхних звеньев КЛГС. Связь с ними определяется участием не только гравигенных, но и водных потоков, возникающих при разгрузке подземных вод (зоны разгрузки протяженностью в сотни метров в бухтах Айну и Двойная). Специфика этого яруса в том, что при формировании морфолитогенной основы ландшафтов проявлялось влияние как вулканической деятельности, так и окружающей морской акватории. Оно сопровождается появлением прибрежно-морского рельефа (серия разновысотных морских террас). В цоколе абразионно-аккумулятивных террас высокого (25–60 м) и среднего (10–25 м) уровней залегают древние вулканические образования (преимущественно андезиты); морские отложения представлены галечниками, которые перекрыты ППЧ с прослоями цунамигенных осадков. Слабонаклонные поверхности террас создают предпосылки для аккумуляции материала в нижних звеньях КЛГС. Аккумулятивная низкая терраса (2–10 м) сложена песками, на которые в тыловой части налегают конусы выноса из эрозионных врезов на абразионных уступах. Эти конусы фиксируют краевую зону аккумуляции КЛГС, хотя ее разрушение возможно при штормовых нагонах и цунами.

Из латеральных потоков со стороны моря выделяются цунами. В зоне их затопления наблюдается активное размывание низких морских террас, перетолжение и вынос материала из нижних звеньев КЛГС, коренная трансформация растительных сообществ и изменение обстановок водной миграции (повышение щелочности). Следы цунами после землетрясений 2006–2007 гг. прослеживаются до высоты 20–25 м и на расстоянии до 400 м от береговой линии. Такие мощные цунами происходят примерно раз в 300 лет, цунами с меньшей высотой волны (6–15 м) – раз в 100 лет, а небольшие – почти ежегодно. Штормовые нагоны отличаются меньшей высотой волн и дальностью проникновения, но происходят ежегодно в осенне-зимний период. Протяженность зоны наложения латеральных потоков со стороны острова и со стороны моря зависит от особенностей береговой зоны и колеблется от первых десятков метров в пределах абразионно-денудационных берегов до первых сотен метров на аккумулятивных побережьях, где возможен вынос материала из нижних звеньев островной КЛГС и увеличение ее «открытости».

Соседство вулканогенных образований с морскими террасами обуславливает внутреннюю гетерогенность ландшафтов нижнего яруса и мозаичные сочетания катен, различающихся по условиям транзита и аккумуляции вещества. По объему перемещенного материала выделяются гравигенные потоки, связанные с селями, особенно вулканогенного происхождения. Во время извержения в июне 2009 г. самый крупный лахар прошел по поверхности 60-метровой морской террасы примерно 750 м от устья долины, перенес и отложил около 0,2 млн м³ твердого материала. Такие лахары проходят через все ярусы КЛГС, разгружаясь на морских террасах. Небольшие сели также могут поставлять материал в береговую зону, достигая пляжей. Суммарный объем селевых потоков (совместно твердая и жидкая фазы), рассчитанный по 15 селевым бассейнам, получился равным 1,62 млн м³. Повторяемость селей в мелких селевых бассейнах составляет в среднем один раз в 3–5 лет, в средних по размеру – каждые 10–15 лет [Иванов и др., 2021].

Одно из следствий поступления вещества в нижние звенья КЛГС – разнообразие геохимических сопряжений в сфере действия латеральных потоков разных типов. На контакте древних вулканических построек и высоких террас селевые потоки выходят на их субгоризонтальную поверхность, что сопровождается появлением конусов выноса, наложенных на галечники. Часто они сливаются друг с другом, образуя пологонаклонный шлейф и фиксируя появление трансаккумулятивных ЭЛ на пролювиально-селевых отложениях, занятых ольховниками и лугами.

Иная ситуация в зоне контакта лавовых потоков с террасами среднего уровня (район бухты Айну), где разгружаются подземные воды, обеспечивающие связь между разными звеньями КЛГС. Воды родников отличаются от талых вод верхнего яруса. При сохранении ведущей роли талассофильных элементов (Cl, Na) наблюдается увеличение pH до 7, минерализации до 88–92 мг/л и содержания основных ионов при возрастании в солевом составе доли сульфатов и Ca (11%-экв.), а в некоторых источниках гидрокарбонат-иона. Такая тенденция связана с выщелачиванием элементов из пирокластических толщ, ППЧ, органогенных горизонтов почв и обогащением ими инфильтрационных вод. Ландшафты верхнего и среднего ярусов в связи с отсутствием зон их разгрузки можно рассматривать как зону формирования и транзита подземных вод. Их связующая роль проявляется при выходе вод и поступлении миграционных потоков на нижний ярус КЛГС, что оказывает влияние на катенарную структуру морских террас.

В гетеролитных катенах автономные и транзлювиальные ЭЛ Н-класса с ольховниками и лугами

на склонах лавовых потоков ниже разгрузки подземных вод сопрягаются с супераквальными (Н–Fe-класс) и аквальными ЭЛ, приуроченными к долинообразному понижению в тыловой части террасы (см. рис. 2В). При нарастании гидроморфности злаково-высокотравные луга на грубогумусных почвах сменяются осоковым низинным болотом, где при близком залегании грунтовых вод (УГВ – 8 см) и замедлении разложения органического вещества ($C_{\text{орг}}$ 1–1,5%) развивается торфонакопление. По сравнению с органогенными горизонтами почв торф обеднен биогенными элементами, в первую очередь Fe, подвижным в условиях оглеения. В то же время замедление БИКа и консервация вещества в супераквальных ЭЛ является одной из причин, ограничивающих потерю элементов в геохимических сопряжениях. Разгружающиеся подземные воды и воды ручьев близки по составу, хотя большинство ручьев не доходит до моря, что снижает передачу импульса воздействия водных латеральных потоков в нижних звеньях КЛГС.

Другая зона разгрузки подземных вод протяженностью 800 м находится на контакте террас среднего и низкого уровня в бухте Айну. Их влияние ярко проявляется в структуре катен эрозионно-суффозионной ложбины, где многочисленные ручьи пересекают супераквальные ландшафты Н–Fe-класса с небольшими озерками. При близком ионном составе воды ручьев и озерков отличаются от вод родников по резкому увеличению содержания Fe (с 4–14 до 60–137 мкг/л) и Mn (с 0,5–1,5 до 9–14 мкг/л) в связи с выносом их при кислом глеевом выщелачивании из торфяных эвтрофных почв. Участие этих элементов в водной миграции свидетельствует, с одной стороны, об их аккумуляции в нижних звеньях КЛГС в своеобразных геохимических ловушках (аквальные ЭЛ бессточных озерков); с другой – о возможности выноса с поверхностным стоком (трансаквальные ЭЛ ручьев). Их контакт с морскими водами при нагонах и цунами свидетельствует об установлении водных связей с океаном в заключительном звене островной КЛГС. В целом сопоставление последствий действия гравигенных и водных потоков в ландшафтах нижнего яруса отражает различие путей транзита и аккумуляции вещества в разных вариантах катен. Их соседство и сочетание определяют сложность организации разных звеньев КЛГС, отвечающих за степень их «открытости».

ВЫВОДЫ

Вулканический остров с центробежным движением потоков вещества к океану рассматривается как единая каскадная ландшафтно-геохимическая система регионального уровня. Ее внутренняя гетерогенность определяется соседством КЛГС бо-

лее низкого ранга (катены, бассейны стока). Специфика организации островной КЛГС обусловлена ведущей ролью гравигенных потоков в отличие от «классических», где превалирует жидкий сток. Водопроницаемость почвенно-пирокластического чехла и неразвитость поверхностного стока ограничивают влияние водных потоков, за исключением мест разгрузки подземных вод.

Нисходящие потоки захватывают разные высотные ярусы, различающиеся по ландшафтной структуре и приуроченности зон мобилизации, транзита и аккумуляции вещества. Импульсное функционирование эруптивного центра сопровождается изменением латеральных потоков и их воздействием на миграционную структуру КЛГС в периоды извержений и между ними. При активизации вулкана преобладают площадные азральные и гравигенные потоки (выпадение тефры, газовые эмиссии, пирокластические потоки и волны и др.). К ним добавляются линейные лавовые потоки и лахары, иногда достигающие прилегающей акватории. Их совместное действие обеспечивает связь между ярусами в открытой островной КЛГС.

Между извержениями включение твердого вещества в механическую миграцию связано с экзогенными процессами, которые неодинаково проявляются на разных ярусах. К ним относятся криогенные, лавинные, селевые, обвально-осыпные процессы, а также линейная эрозия и плоскостной смыв. Для абиогенных ландшафтов верхнего яруса характерны площадные потоки (гравигенное перемещение тефры и др.), накопление в трансаккумулятивных позициях вещества, готового к мобилизации при возникновении селей и лавин. В среднем ярусе стабилизирующая роль растительности тормозит появление площадных гравигенных потоков. В неполных сопряжениях происходит вовлечение

элементов в БИК, накопление на фито- и биогеохимических барьерах Ca, Mg, P, Mn, Cu и др., вынос в подземные воды при кислом выщелачивании. Возникновение линейных потоков в лавинно-селевых бассейнах обеспечивает перенос вещества из верхнего яруса в нижележащие уровни и определяет функцию среднего яруса как зоны транзита и частичной аккумуляции.

На нижнем ярусе усложнение катенарной структуры в заключительном звене КЛГС определяется совместным действием потоков разных видов и формированием зон аккумуляции. Линейные селевые потоки не доходят до океана и образуют конусы на морских террасах. Площадные потоки при разгрузке подземных вод вызывают появление супераквальных и аквальных ЭЛ, где происходит консервация элементов при торфонакоплении и на физико-химических барьерах, аккумуляция в озерах $P_{орг}$. Несмотря на вынос при глеевом выщелачивании Fe, Mn и др. и включение в водную миграцию биогенных элементов, поверхностный сток часто не доходит до океана.

Накопление вещества на селевых конусах и в геохимических ловушках нижнего яруса увеличивает замкнутость островной КЛГС. Возможность ее снижения в периоды между извержениями связана, во-первых, с перемещением материала при камнепадах непосредственно в акваторию, во-вторых, с деятельностью латеральных потоков со стороны океана. Характерное звено островной КЛГС – береговая зона. Ее роль связана с противоречивым взаимодействием разнонаправленных потоков. Это приход вещества из верхних ярусов и накопление в нижнем, разрушение зон аккумуляции во время цунами и при штормовых нагонах, контакт поверхностных и океанических вод и увеличение открытости КЛГС.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГЗ № ЦИТИС: 121051300176-1 «Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авессаломова И.А., Иванов А.Н., Савенко А.В. Водная миграция химических элементов в ландшафтах вулканических островов Центральных Курил (на примере о. Матуа) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 1. С. 73–80.
- Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 350 с.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В. и др. Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 16–26.
- Дегтерев А.В. Петрохимические особенности продуктов современных извержений вулкана Пик Сарычева, остров Матуа (Курилы) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 94–99.
- Иванов А.Н., Моисеев А.И., Хисматуллин Т.И. и др. Полиструктурная организация вулканического ландшафта острова Матуа (Центральные Курилы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 4. С. 140–151.
- Иванов А.Н. Особенности ландшафтной структуры острова Матуа (Центральные Курилы) // Известия РГО. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 26–35.

- Калачева Е.Г., Мельников Д.В., Волошина Е.В. и др. Геохимия кратерных вод озера вулкана Малый Семьячик // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 28–42.
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А. и др. Геохимия кислых термальных вод острова Уруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 5. С. 63–78.
- Касимов Н.С. Базовые концепции и принципы геохимии ландшафтов // Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 23–38.
- Ретеюм А.Ю. Земные миры. М.: Мысль, 1988. 270 с.
- Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г. и др. Активные вулканы Курильских островов: вулкан Пик Сарычева. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2012. 80 с.
- Таран Ю.А., Знаменский В.С., Юрова Л.М. Геохимическая модель гидротермальных систем вулкана Баранского (о-в Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 21–29.
- Aguilera F., Tassi F., Darrah T. et al. Geochemical model of a magmatic – hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile, *Bulletin of Volcanology*, 2012, no. 74, p. 119–134.
- Chorley R.J., Kennedy B.A. *Physical Geography. A Systems Approach*. London, Prentice Hall, 1971, 370 p.
- Fischer T.P. Fluxes of volatiles (H₂O, CO₂, N₂, Cl, F) from arc, *Volcanoes Geochemical Journal*, 2008, vol. 42, p. 21–38.
- Jarrard R.D. Subduction fluxes of water, carbon dioxide, chlorine, and potassium, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, no. 4, p. 1–50.
- Kalacheva E., Taran Y., Voloshina E. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: Geochemistry, solute fluxes and heat output, *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 2017, vol. 346, p. 10–20, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>.
- Straub S.M., Layne G.D. The systematics of chlorine, fluorine, and water in Izu arc front rocks: implications for volatile recycling in subduction zones, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67, p. 4179–4203.
- Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 2018, vol. 19(6), p. 1859–1880, DOI: 10.1029/2018GC007477.
- Taran Y., Zelenski M. Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases, *Geological Society, London, Special Publications*, 2014, vol. 410, no. 1, p. 237–262, DOI: 10.1144/sp410.5.

Поступила в редакцию 18.01.2025

После доработки 25.02.2025

Принята к публикации 20.05.2025

CASCADING LANDSCAPE GEOCHEMICAL SYSTEMS OF VOLCANIC ISLANDS (CASE STUDY OF THE MATUA ISLAND, THE CENTRAL KURIL ISLANDS)

I.A. Avessalomova¹, A.N. Ivanov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: aiageo@yandex.ru

² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru

Possible application of the concept of cascading landscape geochemical systems (CLGS) in relation to islands with active volcanoes is analyzed. The object of the study is the Matua Island with the Sarycheva volcano, which is the most active within the Kuril Islands. The structure of the island's CLGS has three altitudinal levels which differ in morphological and lithological base, exogenous processes, vegetation cover and the elements' migration conditions. It was found that the main lateral flows connecting all levels are the gravitational displacement of tephra, underground runoff with discharge in the lower level at the contact of marine terraces, as well as volcanic mudflows. The surface runoff is almost completely absent, due to high permeability of the soil-pyroclastic cover; as a result, there are no typical catenae associated with water runoff. It is shown that the volcanic CLGS is characterized by pulsing functioning and different types of lateral flows during and between the eruptions. During the period of volcano activation, aerial and gravigenic flows, such as tephra deposition and associated pyroclastic flows and waves, lava flows, gas emissions and lahars, prevail, the solid matter is forced into the mechanical migration. The flows connect the geochemical landscapes of all levels, i.e. upper, middle and lower, and reach the adjacent marine area. During the periods between eruptions, the role of modern exogenous processes, namely avalanches, mudflows and rock falls, and underground water increases; new lateral connections are being formed within the island CLGS. The coastal zone is a characteristic structural element of the CLGS of all volcanic islands. Specific features of its structural and functional organization are determined by multidirectional flows of matter with different chemical composition from the volcanic core and from the ocean, which results in a heterogeneous and mosaic landscape-geochemical structure.

Keywords: island, volcano, geochemical structure, catenae, lateral flows

Acknowledgements. The study was carried out under the state assignment “Factors and processes of spatial-temporal organization of natural and anthropogenic landscapes” (no. 121051300176-1).

REFERENCES

- Aguilera F., Tassi F., Darrah T. et al. Geochemical model of a magmatic – hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile, *Bulletin of Volcanology*, 2012, no. 74, p. 119–134.
- Avessalomova I.A., Ivanov A.N., Savenko A.V. Vodnaya migratsiya khimicheskikh elementov v landshaftakh vulkanicheskikh ostrovov Tsentral'nykh Kuril (na primere o. Matua) [Water migration of chemical elements in the landscapes of volcanic islands of the Central Kuril Islands (case study of the Matua Island)], *Vestnik. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 1, p. 73–80. (In Russian)
- Chorley R.J., Kennedy B.A. *Physical Geography. A Systems Approach*, London, Prentice Hall, 1971, 370 p.
- Degterev A.V. Petrokhimicheskie osobennosti produktov sovremennykh izverzhenii vulkana Pik Sarycheva, ostrov Matua (Kurily) [Petrochemical features of products of modern eruptions of the Sarychev Peak volcano, Matua Island (Kuril Islands)], *Vestn. DVO RAN*, 2011, no. 6, p. 94–99. (In Russian)
- Degterev A.V., Rybin A.V., Melekestsev I.V. et al. Eksplozivnye izverzheniya vulkana Pik Sarycheva v golotsene (o. Matua, Tsentral'nye Kurily): geokhimiya tefry [Explosive eruptions of the Sarychev Peak volcano in the Holocene on the Matua Island, the Central Kuriles: the tephra geochemistry], *Russian Journal of Pacific Geology*, 2012, vol. 6, no. 6, p. 423–432.
- Fischer T.P. Fluxes of volatiles (H_2O , CO_2 , N_2 , Cl, F) from arc volcanoes, *Geochemical Journal*, 2008, vol. 42, p. 21–38.
- Glazovskaya M.A. *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnikh landshaftov* [Geochemical foundations of typology and methodology of natural landscape research], Smolensk, Oikumena Publ., 2002, 288 p. (In Russian)
- Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnikh i tekhnogennykh landshaftov* [Geochemistry of natural and man-made landscapes], Moscow, Faculty of Geography, Moscow St. Un-ty Publ., 2007, 350 p. (In Russian)
- Ivanov A.N. Osobennosti landshaftnoi struktury ostrova Matua (Tsentral'nye Kurily) [Landscape structure peculiarities of the Matua Island (Central Kuril Islands)], *Izvestiya Russkogo geogr. obshchestva*, 2017, vol. 149, no. 5, p. 26–35. (In Russian)
- Ivanov A.N., Moiseev A.I., Khismatullin T.I., Shnyparkov A.L. Polistrukturnaya organizatsiya ostrova Matua (Tsentral'nye Kurily) [Polystructural organisation of volcanic landscapes on the Matua Island (Central Kuril Islands)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 4, p. 140–151. (In Russian)
- Jarrard R.D. Subduction fluxes of water, carbon dioxide, chlorine, and potassium, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, no. 4, p. 1–50.
- Kalacheva E., Taran Y., Voloshina E. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: Geochemistry, solute fluxes and heat output, *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 2017, no. 346, p. 10–20, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
- Kalacheva E.G., Mel'nikov D.V., Voloshina E.V. et al. Geokhimiya kraternykh vod ozera vulkana Mal'j Semjachik [Geochemistry of the Crater Lake of the Maly Semyachik Volcano], *Vulkanologiya i seismologiya*, 2022, no. 3, p. 28–42, DOI: 10.31857/S0203030622030026. (In Russian)
- Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A. et al. Geokhimiya kislykh termal'nykh vod ostrova Urup (Kuril'skie ostrova) [Geochemistry of Acid Thermal Waters of the Urup Island (Kuril Arc)], *Vulkanologiya i seismologiya*, 2021, no. 5, p. 63–78, DOI: 10.31857/S0203030621050035. (In Russian)
- Kasimov N.S. [Basic concepts and principles of landscape geochemistry], *Geokhimiya landshaftov i geografija pochv* [Landscape geochemistry and soil geography], Smolensk, Oikumena Publ., 2002, p. 23–38. (In Russian)
- Reteyum A.Yu. *Zemnye miry* [Earth's worlds], Moscow, Mysl' Publ., 1988, 270 p. (In Russian)
- Rybin A.V., Degterev A.V., Razzhigaeva N.G. et al. *Aktivnye vulkany Kuril'skikh ostrovov: vulkan Pik Sarycheva* [Active volcanoes of the Kuril Islands: the Sarychev Peak volcano], Juzhno-Sahalinsk, Institute of Marine Geology and Geophysics, 2012, 80 p. (In Russian)
- Straub S.M., Layne G.D. The systematics of chlorine, fluorine, and water in Izu arc front rocks: implications for volatile recycling in subduction zones, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67, p. 4179–4203.
- Taran Ju.A., Znamenskij V.S., Jurova L.M. Geokhimicheskaja model' gidrotermal'nykh sistem vulkana Baranskogo (ostrov Iturup, Kuril'skie ostrova) [Geochemical model of hydrothermal systems of the Baransky volcano (Iturup Island, Kuril Islands)], *Vulkanologiya i seismologiya*, 1995, no. 4–5, p. 21–29. (In Russian)
- Taran Y., Zelenski M. Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases, *Geological Society*, London, Special Publications, 2014, vol. 410, no. 1, p. 237–262, DOI: 10.1144/sp410.5.
- Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 2018, vol. 19(6), p. 1859–1880, DOI: 10.1029/2018GC007477.

Received 18.01.2025

Revised 25.02.2025

Accepted 20.05.2025