

УДК 631.4

doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ И ВЫВЕТРИВАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ СРЕДНЕГО УРАЛА (ХРЕБЕТ БАСЕГИ)

И.А. Самофалова

*Пермский государственный аграрно-технологический университет,
г. Пермь, 614990, Россия*

Аннотация

В статье рассматривается применение геохимических показателей по содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов (K, Na, Ca, Mg), а также кремния и алюминия. Исследования проводили на территории хребта Басеги, расположенного на западном склоне Уральской горной страны, на ключевом участке в бассейне реки Малый Басег на горе Северный Басег. Валовый анализ элементов проведен рентгенофлуоресцентным методом. Установлено, что в почвах горно-лесного пояса в большей степени проявляется роль щелочноземельных металлов, а в почвах гольцово-подгольцового – K_2O , MgO. Выявлено практически равномерное распределение K_2O в пространстве и относительно стабильное содержание в почвах. Энтропия химического состава зависит от содержания K_2O , MgO, что является признаком буроземообразования. Определены геохимические показатели, с помощью которых можно диагностировать процессы физического и химического выветривания, почвообразования: суммарное валовое содержание $Mg + Ca + K$ (%), молекулярное отношение CaO/MgO , модуль нормированной щелочности, индекс глиноземистости, щелочной модуль, PIA – плагиоклазовый индекс изменения; интенсивность выветривания. Установлены эволюционно-генетические особенности почв по валовому содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов и геохимической неоднородности почвенного покрова высотных ландшафтов на Среднем Урале.

Ключевые слова: горные почвы, элементы, тип распределения по профилю, энтропия, коэффициент дифференциации, геохимические коэффициенты, литогеохимические индексы, физическое и химическое выветривание, высотные ландшафты

Введение

В почвенно-генетических исследованиях все больше применяют литохимические индексы и геохимические индикаторы, рассчитанные на основе данных валового содержания макро- и микроэлементов [1–13]. Изучение геохимии почв с использованием геохимических параметров позволяет минимизировать влияние неоднородности и пестроты почвенного покрова, а также диагенетических изменений [8, 14–17]. Данные химического состава используют также и для оценки степени выветрелости почв [18–21].

Уникальная особенность Уральского хребта, протянувшегося меридионально с севера на юг Евразии, проявляется в том, что он перераспределяет воздушные

массы западного и восточного переноса, то есть является климаторазделом континента. В связи с этим изучение условий и особенностей формирования почвенного покрова имеет фундаментальное научное и прикладное значение.

Цель настоящего исследования – выявить геохимические показатели по содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов, диагностирующие эволюционно-генетические особенности почв.

1. Материалы и методы

1.1. Географическое положение. Исследования проводили на территории хребта Басеги, включенного в состав ФГБУ «Государственный заповедник "Басеги"», расположенного на западном склоне Уральской горной страны и представляющего собой эталон западноуральской горной тайги. В административном отношении заповедник находится в Пермском крае: в междуречье рек Усьвы и Вильвы (58°45' – 59°00' с.ш., 58°15' – 58°38' в.д.) в пределах Волжско-Камского бассейна.

1.2. Природные условия. В геологическом строении территории участвуют породы верхнепротерозойского возраста, которые подразделяются на басегскую и серебрянскую серии [22]. Территория сложена метаморфическими породами покрытых плащом четвертичных отложений. Хребет Басеги приурочен к полосе устойчивых к выветриванию кварцито-песчаников осянковой свиты – самых древних пород на территории Среднего Урала (кварцевые, слюдисто-кварцевые, полевошпатно-кварцевые разновидности).

Хребет Басеги относится к низкогорной области Среднего Урала к Вишерско-Чусовскому краевому поднятию. Хребет вытянут в соответствии с тектоническим строением в меридиональном направлении и представляет собой цепь из трех гор, самая высокая из которых – Средний Басег (994.7 м). К северу от нее расположен Северный Басег (951.9 м), к югу – Южный Басег (850 м). Вершины разделены седловинами с абсолютными высотами около 650 м. Для всех вершин хребта характерен асимметричный профиль. Ледник в свое время не достиг хребта Басеги, в связи с этим здесь преобладали процессы гольцовой денудации, которая раздробила массив на ряд изолированных вершин. В настоящее время главными рельефообразующими процессами являются деятельность текучих вод, а также гравитационное перемещение продуктов выветривания. Речные долины разработаны слабо в связи с твердостью подстилающих горных пород, но впадины между водоразделами значительны по ширине. На вершинах присутствует эоловый перенос.

Заповедник расположен в умеренном климатическом поясе. Климат континентальный и отличается резкими колебаниями среднегодовой температуры воздуха. Количество выпадающих осадков (800 мм) – наибольшее для Пермского края. На теплый период приходится 60% годового количества осадков. Таким образом, климат типично горный, обуславливающий вертикальную зональность растительности и почвенного покрова.

По геоботаническому районированию Пермского края территория хребта Басеги относится к подрайону пихтово-еловых и березовых лесов района горно-таежных пихтовых лесов. На Среднем Урале выражены горно-лесной, подголь-

цовый (субальпийский), горно-тундровый (альпийский) пояса. Кроме того, хорошо выражены три подпояса подгольцового (субальпийского) пояса (парковое редколесье, криволесье, субальпийские луга) [23].

1.3. Объекты исследования. Объект исследования – почвенный покров хребта Басеги. Исследования проводили на ключевом участке в бассейне реки Малый Басег на горе Северный Басег (2010–2018 гг.). На различных элементах рельефа в наиболее типичных биогеоценозах заложены 12 почвенных разрезов с высоты 930 м (гольцовый пояс) до 315 м (горно-лесной пояс). Образцы отобраны по генетическим горизонтам. Морфологическая диагностика проведена по субстантивно-профильной классификации почв [24].

1.4. Методы исследования. В работе комплексное исследование распределения элементов в почвенном покрове проводили с использованием методического аппарата ландшафтно-геохимических исследований, химического анализа почв, элементов статистики. Анализы проводили на кафедре почвоведения Пермского государственного аграрно-технологического университета общепринятыми методами [25]. Определены показатели: pH_{KCl} и pH_{H_2O} потенциометрически; содержание органического углерода в минеральных почвах по методу Тюрина в модификации [26]; гидролитическая кислотность (Нг); сумма поглощенных оснований; степень насыщенности почв основаниями. Валовое содержание элементов (K, Na, Ca, Mg, Si, Al) определено в лаборатории физико-химии почв Почвенного института имени В.В. Докучаева (г. Москва) на рентгено-флуоресцентном спектрометре ReСпект (ООО «Толоконников», Москва, Россия) и атомно-эмиссионном спектрометре с микроволновой плазмой Agilent 4100 MP-AES, модернизированном под 4200 (Agilent Technologies inc., США) по ГОСТ 33850-2016.

Статистическая обработка и корреляционный анализ проведены с помощью программы «Анализ данных» в Microsoft Excel и программы STATISTICA 6.0; информационно-логический анализ выполнен с использованием программы ALI, разработанной в Алтайском государственном аграрном университете (авторы Л.М. Бурлакова, Д.И. Иваничкин). Уровень значимости оценки результатов статистической обработки достоверен при $p = 0.95$. Рассчитана статистическая энтропия S химического состава почв по [8].

1.5. Геохимические параметры. По содержанию макроэлементов рассчитаны геохимические коэффициенты, индексы, модули, отражающие определенные почвенные процессы, степень выветрелости: суммарное валовое содержание $Mg + Ca + K$ (%) [10]; молекулярное отношение CaO/MgO [10]; НКМ – модуль нормированной щелочности: $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ [27], ИГ – индекс глиноземистости: $Al_2O_3/(CaO + K_2O + Na_2O)$ [28]; ЩМ – щелочной модуль: Na_2O/K_2O [27], PIA – плагиоклазовый индекс изменения: $[(Al_2O_3 - K_2O)/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)] \times 100$ [29]; ИВ – интенсивность выветривания $Al_2O_3/(CaO + MgO + Na_2O + K_2O)$ [30].

1.6. Характеристика почв. В пределах ключевого участка выделены следующие типы почв: бурозёмы, подбуры, подзолы, серогумусовые, литоземы, глеезёмы [31]. Горные почвы развиты на маломощном элювии коренных пород,

поэтому мелкоземисто-обломочные образования служат почвообразующей породой и названы «почво-элювием» [32, 33]. Описание морфологии и характеристика физико-химических свойств почв приведены в ряде работ [9, 34–39]. Содержание органических веществ в почвах колеблется от 1.2% до 21.4%. Почвы характеризуются $pH_{КС}$, равным 3.01–3.97, высокой величиной Нг (в верхних горизонтах колеблется в пределах 8.8–25.2 мг-экв/100 г). Установлено, что почвы обеднены обменными основаниями (1.0–22.3 мг-экв/100 г). Величина емкости катионного обмена (ЕКО) варьирует от низкой (8.8 мг-экв/100 г) до умеренно высокой (42.3), в среднем оставаясь умеренно низкой. Валовой состав и геохимические особенности горных почв Среднего Урала рассмотрены в ранее опубликованных работах (см., например, [40, 41]).

На основании условий формирования и физико-химических свойств для проведения статистической обработки аналитических данных исследуемые почвы условно разделены на три группы: группа 1 (разрезы 18, 28, 29, 30, 31, 32) – гольцово-подгольцовый пояс (криволесье, субальпийские луга); группа 2 (разрезы 15, 17, 19, 24, 26, 27) – горно-лесной пояс и парковое редколесье); группа 3 – без разделения на пояса-подпояса (все почвы). Изложение результатов проведено в пределах выделенных групп.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Валовое содержание оксидов. Учеными установлено, что среднее содержание оксида кремния в почвах составляет около 70% [27, 42].

В почвах на Среднем Урале валовое содержание SiO_2 варьирует от 66.18% до 74.28% в гольцовом поясе (разрезы 18, 30). В почвах криволесья (разрез 32) содержание оксида варьирует в пределах 61–65%. В почвах под субальпийскими лугами содержание SiO_2 несколько ниже (57.2–63.3%). В этой группе почв, формирующихся на высоте более 600 м н. у. м., выделяется подзол (разрез 31), где валовое содержание SiO_2 составляет 80.3–82.6%, понижаясь в почво-элювии до 76.9%.

Высокие содержания SiO_2 (более 75%) встречаются в двух типах осадочных пород: терригенных кварцевых псаммитах и псефитах – типичных рециклизованных породах типа *second cycle* – и в биогенных кремниевых породах: силицитах [43]. Исходным петрофондом при этом выступают каолинитовые коры выветривания по субстрату изверженных и метаморфических пород кислого состава – гранитов и гнейсов.

Валовое содержание SiO_2 в почвах в парковом редколесье и горно-лесном поясе колеблется в пределах 58.8–71.6%. Характерным является то, что по мере приближения от гольцового пояса к горно-лесному накопление SiO_2 на некоторой глубине профиля возрастает, но заметной дифференциации не наблюдается. Это указывает на тенденцию к обеднению SiO_2 верхних и средних частей профиля по сравнению с нижними неизменными (на плотных породах) горизонтами.

Алюминий является литогенным компонентом. Среднее содержание Al_2O_3 в земной коре составляет около 15.1%; по А.Е. Ферсману – 14.1%, по А.П. Виноградову – 15.2%; в почве – 13.5% [42]. В стандартных образцах почв из Европейской части России содержание Al_2O_3 варьирует от 9.64% в дерново-подзолистых почвах до 12.66% в светло-каштановой почве [44].

В исследуемых почвах содержание Al_2O_3 варьирует в среднем от 11.45% до 16.84%, что может указывать на вероятность присутствия в почвах свободных гидроксидов алюминия (бокситов). Можно сказать, что почвы обогащены глиноземом. Однако на некоторых высотных позициях содержание Al_2O_3 ниже кларкового в почвах:

– в криволесье на высоте 794 м н. у. м. (разрез 30, бурозем грубогумусированный) и 743 м н. у. м. (разрез 31, подзол иллювиально-железистый грубогумусированный) по всему профилю почв;

– в парковом редколесье в буроземах на высоте 577 м н. у. м. (разрез 15, восточная экспозиция) и 565 м н. у. м. (разрез 19, западная экспозиция хребта) в гумусовом горизонте.

Возможно, в этих почвах частицы гидроксида алюминия являются неустойчивыми к действию органических лигандов.

Na_2O и K_2O широко распространены в земной коре и играют важную роль в почвообразовательном процессе. Валовое содержание K_2O и Na_2O в почвах группы 2 варьирует в пределах 1.3–2.45% и 0.16–1.59% соответственно; а в почвах группы 1 – от 0.98% до 2.7% и от 0.33% до 2.21%. Почвы большей частью обогащены щелочными металлами, так как их значения выше кларка (1.51% K_2O и 0.84% Na_2O).

Повышенный фон по содержанию Na_2O характерен для почв, формирующихся под луговой растительностью и под высокотравными, папоротниковыми лесами. Для почв криволесья и горной тундры характерно содержание Na_2O ниже кларкового значения. Исключение составляет подзол (разрез 31), в котором отмечается максимальное содержание Na_2O (1.52–2.21%).

Повышенный фон K_2O свойственен практически всем исследуемым почвам, а пониженный фон отмечается только в подзоле с низким содержанием гумуса (разрез 31). Тонкодисперсные минеральные частицы, а также органические вещества почвы обладают высокой способностью депонировать щелочные элементы. Кроме того, K_2O входит в состав вторичных глинистых минералов, которых, по-видимому, в подзоле грубогумусированном практически нет.

Почвы по содержанию щелочноземельных металлов различаются. Так, все исследуемые типы почв обеднены валовым CaO в сравнении с кларком по этому оксиду 1.92%. В почвах криволесья и горной тундры (разрезы 18, 30, 31, 32) содержание CaO изменяется в пределах 0.07–0.36% и является наиболее низким среди изучаемых профилей. Таким образом, в наиболее выветрелых профилях почв содержание валового CaO снижается до 0.07% (в подзолистом горизонте в подзоле, разрез 31). В органо-аккумулятивных почвах и буроземе глееватом ожелезненном на южном склоне на высоте 613–590 м н. у. м. содержание CaO значительно выше и составляет 0.76–1.20%. Это указывает на большее проявление процессов почвообразования над выветриванием на данной высоте в сравнении с другими условиями формирования почв. В буроземах паркового редколесья на восточном склоне горы на высотах 590–577 м н. у. м. содержание валового CaO изменяется по профилю в пределах 0.51–0.42% и 0.30–0.39% соответственно. Причем в буроземе, расположенном выше (590 м н. у. м.), более низкое содержание CaO связано с проявлением поверхностно-бокового выноса вещества

в почвы, расположенные ниже. В буроземах на западном склоне горы содержание оксида по профилю изменяется более дифференцированно.

Содержание MgO в горных почвах выше, чем содержание CaO. Так, в почвах субальпийских лугов, паркового редколесья и горно-лесного пояса содержание MgO изменяется в пределах 1.13–2.92% при кларке 1.04%. Менее всего валового магния содержится в почвах криволесья, и особенно в подзоле (разрез 31), но при этом его содержание все равно выше, чем CaO. В буроземах криволесья (разрезы 30 и 32) отмечается резкое разделение профиля по содержанию MgO: в гумусовых горизонтах до глубины 22–32 см содержится меньше кларка (0.41–0.71% и 0.96–0.82% соответственно). В почвах группы 2 содержание магния стабильно выше кларка. Большее содержание MgO возможно объяснить тем, что он входит в состав образующихся вторичных глинистых минералов, и поэтому его содержание выше даже в горизонтах высокой степени выветрелости.

Содержание CaO, MgO в большей степени варьирует в почвах подгольцового пояса (группа 1), чем в горно-лесном поясе (группа 2).

2.2. Распределение по профилю. Степень выноса и накопления оксидов определяли по коэффициенту элювиально-иллювиальной миграции (отношение SiO_2 : оксид в породе к SiO_2 : оксид в горизонте). В почвах, формирующихся на высоте более 700 м (разрезы 18, 30, 32), отмечается интенсивный вынос калия, кальция и магния. В подзоле (разрез 31) вниз по профилю мигрируют практически все элементы и в большей степени кальций, максимально накапливается только MgO, который высвобождается в больших количествах при физическом и химическом выветривании минералов и пород. Почвы, формирующиеся под злаково-разнотравными лугами (разрезы 28, 29), отличаются накоплением CaO в верхней части профиля и некоторой убылью MgO по профилю. Распределение остальных элементов по профилю практически постоянно или отмечается слабая убыль или слабое накопление.

В буроземах паркового редколесья (разрезы 17, 19) отмечается интенсивный вынос из профиля CaO, MgO. В буроземах глееватых (разрезы 27, 15) происходит интенсивная убыль по MgO, остальные элементы распределены относительно равномерно. В буроземе в горно-лесном поясе (разрез 26) отмечается слабое накопление щелочных и щелочноземельных макроэлементов в пределах профиля. В глееземе грубогумусированном (разрез 24) паркового редколесья практически все элементы по профилю распределены дифференцированно с интенсивным и средним выносом из глеевого горизонта.

Распределение элементов по профилю описывали с помощью индекса распределения (ID – Distribution Index), равного отношению содержания элемента в почвенном горизонте к его содержанию в нижнем горизонте (почво-элювии). Значения индекса < 1 указывают на отсутствие накопления; $1 \leq ID \leq 3$ – на умеренное накопление; $3 \leq ID \leq 6$ – на сильное накопление; $ID > 6$ – на очень сильное накопление элемента в профиле почвы [45].

Индексы распределения позволяют количественно оценить контрастность горизонтов в почвенном профиле (табл. 1). Наиболее контрастными по распределению оксидов являются почвы, формирующиеся в переходных экотонах: криволесье – разнотравный луг (разрез 30); криволесье – парковый лес (разрез 31);

Табл. 1

Коэффициенты дифференциации профиля почв

Ок-сиды	№ почвенного разреза												D
	18	30	31	32	29	28	27	17	15	19	24	26	
CaO	1.24	1.67	2.24	1.10	1.05	1.48	1.13	1.35	1.21	2.24	1.02	1.16	0.19
MgO	1.04	3.17	1.36	1.47	1.06	1.51	1.33	1.44	1.94	2.96	1.34	1.22	0.49
K ₂ O	0.96	1.05	1.21	1.04	1.08	1.10	1.05	1.10	1.05	1.96	1.03	1.02	0.07
Na ₂ O	1.21	1.31	1.45	1.86	1.46	1.85	3.03	4.49	1.04	1.27	1.02	1.65	1.00

Примечание: D – дисперсия.

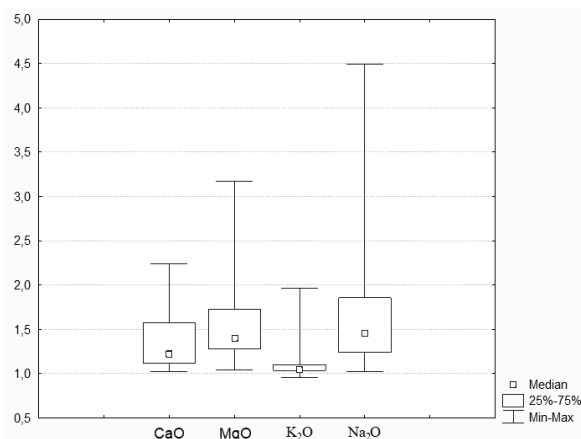


Рис. 1 Статистическое распределение коэффициентов дифференциации профиля почв по содержанию макроэлементов ($n = 12$)

парковый лес – таежный лес (разрезы 27 (южная экспозиция), 17 (восточная), 19 (западная)). В переходных экотонах накладываются процессы, проявляющиеся как в нижележащих, так и в вышележащих почвах, что определяет значительное разнообразие свойств почв и выраженную контрастность почвенного профиля. В целом в почвах разных экотонот отмечается умеренное накопление элементов.

Рассматривая контрастность профилей почв без учета типовой и высотной принадлежности, а только по варьированию коэффициентов дифференциации в пространстве, отметим следующее. Значительным варьированием в пространстве отличаются оксиды Na₂O и MgO (рис. 1). Медианные значения коэффициентов дифференциации оксидов стабильно больше единицы, что диагностирует умеренное и сильное их накопление. Выявлено практически равномерное распределение K₂O в пространстве, что указывает на нормальное его распределение и относительно стабильное содержание в почвах.

Характер профильного распределения элементов – это важный диагностический признак процессов, происходящих в почве. Полученные экспериментальные данные подтверждают это.

2.3. Энтропия и оксиды. Максимальные значения энтропии в верхних горизонтах и по всему профилю ($S = 1.66$ – 1.73) отмечаются в почвах под субальпийскими лугами (разрезы 29, 28), что является выше среднего для почв (1.36 – 1.40). Эти данные указывают на слабую дифференциацию оксидов в почвах и возможное преобладание почвообразования над выветриванием. Степень варьирования

Табл. 2

Коэффициенты корреляции между энтропией и оксидами

Пояс, высота н. у. м., м	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
Без разделения на высотные пояса, 930–315	0.793	0.029	0.604	0.747
Гольцовый и подгольцовый пояса, 930–600	0.949	-0.353	0.588	0.783
Горно-лесной пояс, 600–300	0.378	0.488	0.624	0.603

признака является незначительной ($V = 1.0-1.9\%$). В буроземах значения энтропии несколько ниже, что связано с большей дифференциацией оксидов под елово-пихтовыми крупнотравными лесами (разрезы 15, 17, 19, 26, 27). Причем стоит отметить, что в буроземах на склоне западной экспозиции энтропия в почвах выше (1.54–1.65), чем в буроземах на склоне восточной экспозиции (1.32–1.47). В почвах, развивающихся в более суровых условиях (на высоте 700–930 м н. у. м.), энтропия понижается (дерново-подбур, разрез 18, $S = 1.36-1.37$). В подзоле (разрез 31) значение энтропии меньше 1.0 и только в горизонте *BF* составляет 1.09, то есть в профиле максимально выражена дифференциация химического состава и соотношения элементов являются контрастными.

Изменение щелочноземельных и щелочных макроэлементов по профилю почв оценивали с изменением энтропии по парным коэффициентам корреляции по высотно-растительным поясам и по типам почв. Так, в почвах горно-лесного пояса средняя связь установлена между энтропией и содержанием оксидов щелочноземельных элементов CaO, MgO, то есть степень дифференциации почвенного профиля в первую очередь зависит от распределения этих оксидов в профиле. С остальными оксидами связь менее 0.5 (табл. 2).

В подгольцовом и гольцовом поясах (почвы группы 1) между энтропией и содержанием оксидов установлена высокая (более 0.7) с K₂O, MgO и средняя зависимость с CaO. Таким образом, в этих условиях (на высоте 600–930 м н. у. м.) в дифференциации химического состава почв участвуют три элемента.

При анализе зависимости между S и содержанием оксидов независимо от высоты местности отмечается высокая зависимость энтропии от K₂O, MgO. Вероятно, высвобождение и распределение этих оксидов является признаком буроземообразования, в результате которого происходит разрушение первичных минералов с образованием вторичных глинистых минералов.

2.4. Геохимические показатели. Интерпретация валового химического состава проводится на уровне сопоставления и соотношения отдельных элементов и их пар, так как использование всех данных без обработки и обобщения информации затрудняет выявление закономерностей и получение новой информации. Для извлечения дополнительной информации применили ряд геохимических показателей и модулей.

Суммарное валовое содержание CaO + MgO + K₂O в почвах гольцово-подгольцового пояса (табл. 3) указывает на отсутствие потери оснований в подбуре (разрез 18) на высоте 930 м н. у. м. и в почвах, сформировавшихся под луговой растительностью (разрезы 29, 28) на высоте 590–613 м н. у. м. В буроземах и подзоле наблюдается отчетливо выраженный процесс дебазации.

Табл. 3

Геохимические коэффициенты и модули в почвах гольцово-подгольцового пояса

Горизонт, см	Геохимические коэффициенты и модули						
	Ca + Mg + K, %	CaO/MgO	ИВ	НКМ	ЦМ	ИГ	РА
Разрез 18, 930 м н. у. м., дерново-подбур иллювиально-железистый							
AY, 6–24	2.80	0.14	1.87	0.194	0.401	4.682	92
BF, 24–41	2.82	0.17	1.81	0.195	0.504	4.584	91
Разрез 30, 794 м н. у. м., бурозем грубогумусированный							
AУ _{ao} , 13–23	1.82	0.32	2.68	0.206	0.358	4.521	92
AУ, 23–32	2.12	0.25	2.44	0.189	0.286	4.791	93
BM, 32–50	2.46	0.16	1.94	0.185	0.386	4.824	92
C, 50–75	2.60	0.15	1.70	0.215	0.617	4.204	89
Разрез 31, 743 м н. у. м., подзол грубогумусированный							
ao, 6–9	1.10	0.45	1.46	0.378	1.553	2.483	77
E, 9–22	1.26	0.14	1.54	0.368	1.859	2.658	78
BF, 22–33	1.55	0.91	3.10	0.217	0.536	4.377	91
Разрез 32, 691 м н. у. м., бурозем ожелезненный							
ay, 5–9	2.91	0.12	2.23	0.223	0.222	4.275	94
AУ, 9–22	2.82	0.15	2.61	0.198	0.144	4.778	96
AУf, 22–37	3.07	0.11	2.41	0.333	0.124	5.051	96
BM, 37–58	3.02	0.11	2.22	0.201	0.240	4.725	94
C, 58–68	3.29	0.11	2.06	0.198	0.244	4.724	94
Разрез 29, 613 м н. у. м., бурозем ожелезненный							
ay, 3–8	3.91	0.26	1.30	0.226	0.366	3.552	88
AУ, 8–18	3.96	0.26	1.29	0.259	0.495	3.226	86
BMf, 18–74	3.92	0.21	1.23	0.272	0.715	3.166	84
Разрез 28, 609 м н. у. м., серогумусовая метаморфизированная							
AУ, 4–13	4.03	0.51	1.08	0.260	0.393	2.692	86
aum, 13–18	3.98	0.31	1.18	0.243	0.404	3.173	88
AУm, 18–35	4.50	0.23	1.10	0.262	0.662	3.124	76
C, 33–43	4.54	0.25	1.10	0.240	0.464	3.249	81

В буроземах паркового редколесья и в горно-лесном поясе, а также в глееземе (разрез 24) заметна дифференциация профиля по суммарному валовому содержанию К, Са и Mg на две части: гумусовые горизонты обеднены данными элементами, а структурно-метаморфические, напротив, обогащены (табл. 4). Возможно, на границе раздела создается геохимический барьер по этим элементам.

Содержание Са и Mg в валовом составе контролирует степень выветрелости почвообразующего материала. Отношение СаО/MgO значительно меньше кларкового (1.84) в 3.6–16.7 раз и составляет 0.11–0.51. Это еще раз доказывает, что почвы на Среднем Урале обеднены валовым кальцием. Молекулярное отношение оксидов диагностирует биологическое накопление кальция в верхней части профиля буроземов и серогумусной метаморфизированной почвы. Отношения оксидов закономерно снижаются сверху вниз по профилю. Данная закономерность не проявляется в дерново-подбуре (разрез 18, высота 930 м н. у. м.), подзоле (разрез 31, высота 743 м н. у. м.) и глееземе (разрез 24, высота 518 м н. у. м.). Наиболее узкий диапазон значений отношения СаО/MgO, резко отличающийся от такового в выше- и нижележащих горизонтах, отмечается в подзолистом горизонте.

Табл. 4

Геохимические коэффициенты и модули в почвах паркового редколесья и горной тайги

Горизонт, см	Геохимические коэффициенты и модули						
	Ca + Mg + K, %	CaO/MgO	ИБ	НКМ	ЩМ	ИГ	РА
Разрез 27, 595 м н. у. м., бурозем глееватый ожелезненный							
AYf, 4–12	3.89	0.40	1.41	0.213	0.499	3.539	87
AYg, 12–26	3.91	0.36	1.44	0.208	0.340	3.674	90
VMg, 26–57	4.34	0.32	0.91	0.344	1.071	2.339	91
Cf,g, 57–67	4.41	0.34	1.07	0.280	0.721	2.784	91
Разрез 17, 590 м н. у. м., бурозем ожелезненный							
AY, 4–13	2.67	0.23	2.27	0.164	0.079	5.264	82
AYf, 13–23	2.90	0.15	1.96	0.182	0.210	4.923	89
VMf, 23–32	3.13	0.17	1.78	0.203	0.321	4.371	86
VM, 32–46	3.16	0.18	1.91	0.169	0.083	5.079	82
C, 46–56	3.40	0.15	1.65	0.210	0.359	4.251	89
Разрез 15, 577 м н. у. м., бурозем глееватый							
AYao, 10–14	2.70	0.35	1.68	0.245	0.490	3.494	90
AY, 14–21	3.10	0.18	1.58	0.214	0.493	4.103	91
VMg, 21–43	3.31	0.15	1.58	0.201	0.456	4.379	89
Cg, 43–70	3.05	0.19	1.70	0.206	0.364	4.241	93
Разрез 19, 565 м н. у. м., бурозем элювиированный							
AY, 6–15	1.80	0.26	1.34	0.305	0.846	2.911	91
VMel, 15–30	3.58	0.19	1.47	0.210	0.459	4.035	90
VM, 30–72	3.82	0.19	1.24	0.237	0.594	3.552	81
C, 72–82	4.42	0.35	1.09	0.266	0.654	2.879	85
Разрез 24, 518 м н. у. м., глеезем грубогумусированный							
G, 16–36	2.86	0.22	1.66	0.220	0.532	3.967	84
GC, 35–58	3.22	0.17	1.59	0.202	0.508	4.310	85
Cg, 58–70	3.46	0.22	1.61	0.178	0.342	4.604	96
Разрез 26, 315 м н. у. м., бурозем глинисто-иллювиированный							
AY, 5–22	3.10	0.18	1.61	0.224	0.504	3.946	94
AYi, 22–33	2.86	0.19	2.11	0.177	0.310	5.006	92
VM, 33–57	3.04	0.17	1.68	0.206	0.380	4.287	95
C, 57–67	3.10	0.20	1.67	0.225	0.433	3.926	91

Интенсивность выветривания (ИБ) почвенно-грунтового материала в почвах изменяется в широком диапазоне: от 0.91 до 3.10. Минимум развития процессов выветривания по отношению $Al_2O_3/(CaO + MgO + Na_2O + K_2O)$ фиксируется в органо-аккумулятивных почвах (1.08–1.30), формирующихся под луговым разнотравьем, в буроземе элювиированном (1.09–1.47), буроземе глееватом ожелезненном (1.07–1.44) под крупнотравными лесами. Максимальная интенсивность выветривания, причем по всему профилю, отмечается в буроземах и дерново-подбуре, образующихся в более суровых условиях на высоте более 650 м н. у. м. Показатель изменяется в пределах 1.80–2.68. В буроземах паркового редколесья и горно-лесного пояса интенсивность выветривания несколько ниже и изменяется в диапазоне 1.65–2.27.

В работах [7, 13, 29] установлено, что возрастание значений ИВ свидетельствует об усилении континентальности климата, возрастании значений экстремальных температур. Это положение объясняет более высокую интенсивность выветривания в почвах на высоте более 650–700 м н. у. м. Более древние отложения характеризуются и более высокой степенью преобразованности под воздействием процессов выветривания и почвообразования [13]. Резкая смена значений показателя в пределах профиля может диагностировать древние и молодые отложения.

Сравнивая ИВ в почвах на высоте более 650 и ниже 650 м н. у. м., можно сделать заключение о большей степени преобразованности минеральной части почв на более высоких позициях хребта. Наиболее дифференцированный профиль по интенсивности выветривания отмечается в подзоле (разрез 31), где на глубине 22–33 см ИВ максимальный – 3.10. Соответственно, можно предположить, что горизонт *BF* является более древним, чем вышележащие горизонты.

Почвы паркового редколесья и горно-лесного пояса (группа 2) являются дифференцированными по интенсивности выветривания, то есть химический состав горизонтов формировался в различных гидротермических условиях.

2.5. Литогеохимические индексы. Для уточнения условий формирования терригенной компоненты осадков определен ряд литогеохимических индексов, среди которых особое место занимают индексы выветривания.

Почвенная масса горных почв включает в большом количестве песчаные и пылеватые частицы, представленные преимущественно кварцем (SiO_2) и полевыми шпатами (носителями CaO и Na_2O). Носителем K_2O в илистой фракции почв являются минералы группы слюды и иллитов, поэтому, анализируя распределение K_2O в валовом химическом составе по профилю, можно судить о распределении по горизонтам этих минералов [46]. Молекулярные отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ диагностируют степень изменения минералогического состава по профилю почв, и соответственно, степень выветрелости и наличия минералов-носителей данных элементов. При более широких пределах значений данного отношения преобладают полевые шпаты, а при более узких – минералы слюды и иллитов.

По изменению отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (щелочной модуль, ЦМ) определены пять типов распределения показателя по профилю: равномерно-элювиальный (разрезы 18, 29); равномерно-аккумулятивный (разрезы 15, 24, 27); аккумулятивно-элювиально-иллювиальный (разрезы 30, 32, 17, 19, 26); элювиально-иллювиальный (разрез 28); прогрессивно-аккумулятивный (разрез 31). Таким образом, возможна различная степень изменения минералогического состава по профилю почв.

Равномерно-элювиальное распределение диагностирует элементарные почвообразовательные процессы метаморфизма минерального вещества в дерново-подбуре (разрез 18) и буроземе (разрез 29).

Равномерно-аккумулятивное распределение в почвах с признаками оглеения и глеевыми горизонтами указывает на различия профилей по минералогии: в гумусовой части преобладают минералы слюды и иллитов, а в нижней, более глееватой части отмечается более широкий диапазон значений отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (выше в два раза, чем в гумусовой), что указывает на преобладание полевых шпатов в нижних горизонтах. Таким образом, равномерно-аккумулятивный тип

распределения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ возможно использовать для индикации процесса оглеения и, соответственно, для глееватости профиля, а возможно и для полигенетичности.

Аккумулятивно-элювиально-иллювиальное распределение встречается в буроземах и диагностирует процессы: ожелезнение, иллювиирование, выщелачивание, лессиваж, кислотный гидролиз глин. Почвы на глубине 20–30 см характеризуются менее значительным диапазоном значений отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, что указывает на процессы иллитизации и образования вторичных минералов *in situ*.

Элювиально-иллювиальный и прогрессивно-аккумулятивный типы распределения взаимно противоположны и, соответственно, диагностируют диаметрально противоположные процессы в почвах по ЩМ: метаморфизацию (образование вторичных минералов) и разрушение слабоустойчивых минералов и накопление кислот первичных минералов (полевых шпатов), обогащенных натрием (альбит и олигоклаз).

Щелочной модуль $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ – важная характеристика, отличающая глинистые породы ($\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$) от обломочных ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), за исключением некоторых калиевых аркозов и глинистых пород с преобладанием монтмориллонита [27]. Высокие значения ЩМ (больше единицы) характерны для граувакк, которые являются продуктами ледового литогенеза [47], при котором химическое выветривание субстрата было минимальным. Повышенное значение ЩМ создается примесью полевошпатовой (альбитовой) пирокластике. Таким образом, аномально высокое значение ЩМ может служить средством диагностики ледниковых отложений.

В изучаемых почвах высокие значения ЩМ отмечаются в подзоле (743 м) в верхней маломощной части профиля на глубине 6–22 см с максимальным значением в подзолистом горизонте (1.85), который можно считать результатом морозного выветривания. ЩМ > 1 обнаружен и в буроземе глееватом (разрез 27) на глубине 26–57 см (горизонт *BMg*). Эти разрезы расположены в переходных экотонах и геоморфологически в переходных зонах: подзол на границе поверхности выравнивания; бурозем глееватый приурочен к межгорной седловине, где возможно формирование придолинных ледников.

В горизонтах почв, где отмечаются минимальные изменения отношения $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$, морфологически выражены процессы элювиированности и ожелезненности (0.21–0.28). Максимальной степенью элювиированности отличается разрез 31 – подзол. Таким образом, НКМ может диагностировать степень выщелоченности и элювиированности в пределах профиля.

НКМ содержит информацию о соотношении двух главных типов щелочных алюмосиликатов: полевых шпатов и слюд. Слюды являются более глиноземистыми, чем полевые шпаты, в связи с чем низкие значения НКМ свидетельствуют о преобладании слюд, а высокие – о преобладании полевых шпатов [27]. Значение НКМ для мусковита равно 0.31. Если НКМ породы больше 0.31, то в ней присутствует калиевый полевой шпат (или какой-то иной высококалийный минерал). Если значение НКМ меньше 0.31, то присутствие калишпата хотя и возможно, но уже необязательно.

В почвах хребта Басеги значения НКМ ниже 0.40, и это указывает на то, что присутствие полевых шпатов в почвах незначительно и они не являются поро-

дообразующими. «Чувствительность» этого геохимического модуля выше в кислых условиях. По модулю НКМ почвы можно отнести к гипощелочным (< 0.20) и нормальнощелочным ($0.20-0.40$).

Плагиоклазный модуль (PIA) показывает, насколько мобильные элементы Ca, Na и K по отношению к немобильному Al сохраняются или мигрируют при выветривании. Считается, что при химическом выветривании горные породы теряют мобильные элементы, причем чем выше степень выветривания, тем меньше в них остается мобильных элементов и выше значения приведенных индексов. Считается, что химическое выветривание проходит более интенсивно при теплом и влажном климате, поэтому индекс часто используют как климатический индикатор [2, 29].

Показатель PIA изменяется в почвах хребта Басеги от 76 до 96 ед., что указывает на гумидные и увлажненные условия почвообразования на Среднем Урале и на то, что минеральная часть почв прошла существенную переработку. Близкие коэффициенты указывают на то, что существенных флуктуаций на территории не наблюдалось, климат на протяжении всего педогенеза сохранял влажную тенденцию, аридные фазы не зафиксированы. Величина показателя варьирует в пространстве в зависимости от высотных условий формирования почв, а также и в пределах профилей, что указывает на локальные различия условий почвообразования и выветривания. С помощью информационно-логического анализа определены: связь между значениями PIA и высотными условиями (более 700 м н. у. м., менее 700 м н. у. м.) и специфичные состояния PIA. Установлено, что значения PIA менее 80 ед. наиболее специфичны для почв, формирующихся на высоте более 700 м, а более 80 ед. – для почв, формирующихся на высоте менее 700 м н. у. м. В первом случае для почв характерно низкоумеренное химическое выветривание, во втором случае – интенсивное химическое выветривание. Это подтверждает и интенсивность выветривания.

Заключение

Определены геохимические показатели по валовому содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов, кремния, алюминия, с помощью которых можно проводить диагностику процессов физического и химического выветривания, почвообразования: суммарное валовое содержание $Mg + Ca + K$ (%), молекулярное отношение CaO/MgO , модуль нормированной щелочности, индекс глиноземистости, щелочной модуль, плагиоклазовый индекс изменения; интенсивность выветривания. На основании их геохимической индикации установлены эволюционно-генетические особенности горных почв и их геохимическая неоднородность в высотных ландшафтах на Среднем Урале.

1. Почвы характеризуются диапазоном варьирования K_2O , Na_2O , MgO стабильно выше почвенного кларка, а CaO – стабильно ниже почвенного кларка, то есть почвы сильно обеднены кальцием.

2. Наиболее контрастными по распределению оксидов являются почвы, формирующиеся в переходных экотонах: криволесье – разнотравный луг, криволесье – парковый лес, парковый лес – таежный лес.

3. Содержание щелочных и щелочноземельных макроэлементов контролирует степень выветрелости почвообразующего материала: более выветрелыми

являются почвы на высоте более 650–700 м н. у. м., выше которой расположены подпояс криволесье и пояс горной тундры.

4. Различная степень преобразованности минеральной части почв диагностирует разновозрастность профилей и диагностических горизонтов и генетических признаков в почвах.

5. В почвах в переходных экотонах и геоморфологически переходных зонах (границы поверхностей выравнивания, межгорная седловина) по литогеохимическим индексам, диагностирующим неоднородность почв по минералогическому составу, установлено минимально проявляющееся химическое выветривание субстрата при максимальном его физическом (морозном) выветривании.

6. Геохимическая интерпретация содержания щелочных и щелочноземельных макроэлементов помогла выявить природный рубеж проявления неоднородности: в почвах на высоте более 700 м н. у. м. преобладает физическое выветривание и высокое содержание обломков, а в почвах, формирующихся ниже 700 м н. у. м., преобладают процессы химического выветривания с разной проработанностью минерального состава почв.

Литература

1. Bowen H.I.M. Environmental Chemistry of the Elements. – London, N. Y.: Acad. Press, 1979. – 333 p.
2. Nesbitt Y.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. – 1982. – V. 299. – P. 715–717. – doi: 10.1038/299715a0.
3. Nesbitt H.W., Young G.M. Formation and diagenesis of weathering profiles // J. Geol. – 1989. – V. 97, No 2. – P. 129–147.
4. Retallack G.J. Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology. – Oxford: Blackwell Sci., 2001. – xi+404 p. – doi: 10.1002/9780470698716.
5. Дружинина О.А. Результаты геохимических исследований культурного слоя археологического памятника Рядино-5 // Вестн. Балт. фед. ун-та им. И. Канта. – 2012. – Вып. 1. – С. 29–33.
6. Родионова М.Е. Особенности изменения валового химического состава лесостепных и степных почв в результате их агрогенных трансформаций // Фундаментальные исслед. – 2012. – № 3. – С. 333–338.
7. Рябогина Н.Е., Борисов А.В., Иванов С.Н., Занина О.Г., Савицкий Н.М. Природные условия на юге Среднерусской возвышенности в хазарское время (IX–X вв.) // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. – 2013. – № 3. – С. 182–194.
8. Калинин П.И. Применение геохимических коэффициентов для исследования подкурганых палеопочв // Материалы Всерос. науч. конф. по археологическому почвоведению. – Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2014. – С. 120–123.
9. Самофалова И.А., Лузянина О.А., Кондратьева М.А., Мамонтова Н.В. Элементный состав почв в ненарушенных экосистемах на Среднем Урале // Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 67–74.
10. Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А. Хроноряды почв и структура Красной книги почв Крыма // Красная книга почв и ее значение для охраны почвенного покрова: Материалы Всерос. науч. конф. / Отв. ред. И.В. Костенко. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. – С. 110–114.

11. *Масленникова А.В., Дерягин В.В.* Геохимические индикаторы условий голоценового седиментогенеза на Урале // Конф. молодых ученых-2011 «Современные проблемы геохимии». – Иркутск: Ин-т геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 2011. – URL: <http://conf.ict.nsc.ru/youngconf-2011/ru/reportview/49388>.
12. *Кулижский С.П., Родикова А.В.* Геохимическая дифференциация почв котловины озера Шира // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2009. – № 3. – С. 103–108.
13. *Калинин П.И., Алексеев А.О., Кудреватых И.Ю., Ваганов И.М.* Количественные климатические реконструкции плейстоцена на основе изучения лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2» (Приазовье) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2016. – № 2. – С. 22–30.
14. *Муравьев Ф.А., Арефьев М.П., Силантьев В.В., Гареев Б.И., Баталин Г.А., Уразаева М.Н., Кропотова Т.В., Выборнова И.Б.* Палеогеографические условия накопления красноцветных алевропелитов средней-верхней перми на территории Казанского Поволжья // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 4. – С. 548–568.
15. *Александрова А.Б., Гордиенко Т.А., Вавилов Д.Н., Валиев В.С., Иванов Д.В., Рупова Э.Х.* Современное состояние почв и мезофауны природного заказника «Голубые озера» Республики Татарстан // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 1. – С. 101–116.
16. *Tunçay T., Dengiz O.* Chemical weathering rates and geochemical-mineralogical characteristics of soils developed on heterogeneous parent material and toposequence // *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* – 2016. – V. 11, No 2. – P. 583–598.
17. *Senol H., Tunçay T., Dengiz O.* Geochemical mass balance applied to the study of weathering and evolution of soils // *Indian J. Geo Mar. Sci.* – 2018. – V. 47, No 9. – P. 1851–1865.
18. *Tyler G.* Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol // *Geoderma*. – 2004. – V. 119, No 3–4. – P. 277–290. – doi: 10.1016/j.geoderma.2003.08.005.
19. *Nordt L.C., Driese S.D.* New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols // *Geology*. – 2010. – V. 38, No 5. – P. 407–410. – doi: 10.1130/G30689.1.
20. *Дымов А.А., Zhangurov E.V., Hagedorn F.* Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains // *Catena*. – 2015. – V. 131. – P. 140–148. – doi: 10.1016/j.catena.2015.03.020.
21. *Самофалова И.А.* Изучение неоднородности почвенного покрова в заповеднике «Басеги» (Средний Урал) // Прошлое и современное состояние, прогноз развития географических систем: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием / Сост. А.М. Прокашев. – Киров: Изд-во ВятГГУ, 2014. – С. 159–163.
22. *Летопись природы заповедника «Басеги» за 1996 г.* Кн.10 – Гремячинск, 1997. – 310 с.
23. *Горчаковский П.Л.* Растительный мир высокогорного Урала. – М.: Наука, 1975. – 284 с.
24. *Полевой определитель почв.* – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с. – URL: http://esoil.ru/images/stories/pdf/Field_guide.pdf.
25. *Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой.* – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
26. *Антонова З.П., Скалабан В.Д., Сучилкина Л.Г.* Определение содержания в почвах гумуса // *Почвоведение*. – 1984. – № 11. – С. 130–133.
27. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – 479 с.
28. *Maniari P.D., Piccoli P.M.* Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 1989. – V. 101, No 5. – P. 635–643. – doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2.

29. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*. – 1995. – V. 23, No 10. – P. 921–924. – doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2.
30. Алексеев А.О., Алексеева Т.В. Оксидогенез железа в почвах степной зоны. – М.: ГЕОС, 2012. – 204 с.
31. Самофалова И.А. Использование бассейнового подхода для изучения дифференциации растительного и почвенного покровов (хребет Басеги, Средний Урал) // *География и природные ресурсы*. – 2020. – № 1. – С. 175–184. – doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-1(175-184).
32. Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. – М.: Наука, 1971. – 268 с.
33. Айрапетян Т.А., Черняховский А.Г., Градусов Б.П., Бальян А.С. Первичные почвенно-элювиальные образования основных биоклиматических поясов массива г. Арагац // *Изв. АН Армянской ССР. Науки о Земле*. – 1975. – № 2. – С. 78–93.
34. Samofalova I., Luzyanina O., Maulina E., Kulkova L. Features soil mountain-taiga zone the Middle Urals // *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. Technol.* – 2012. – V. 2 Ek:A, No 2 Sp:A. – P. 93–100.
35. Самофалова И.А., Лузянина О.А. Эколого-генетическая характеристика почв горнолесного пояса на Среднем Урале // *Изв. Сам. науч. центра РАН*. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 1426–1431.
36. Samofalova I. Genetic Characteristics of brown forest soils on the Middle Urals // *Am. J. Environ. Prot.* – 2015. – V. 4, No 3-1. – P. 148–156.
37. Самофалова И.А., Кондратьева М.А. Буферность горных почв субальпийского пояса к кислотному воздействию (заповедник «Басеги») // *Перм. аграр. вестн.* – 2016. – № 3. – С. 94–103.
38. Самофалова И.А. Разнообразие почв низкогорных ландшафтов и особенности их формирования на западном макросклоне Среднего Урала (заповедник «Басеги») // *Перм. аграр. вестн.* – 2017. – № 3. – С. 10–17.
39. Самофалова И.А. Почвенное разнообразие тундровых и гольцовых ландшафтов в заповеднике «Басеги» // *Геогр. вестн.* – 2018. – № 1. – С. 16–28.
40. Самофалова И.А., Рогова О.Б., Лузянина О.А., Савичев А.Т. Геохимические особенности распределения макроэлементов в почвах ненарушенных ландшафтов Среднего Урала (на примере заповедника «Басеги») // *Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева*. – 2016. – № 85. – С. 56–76.
41. Samofalova I.A., Rogova O.B., Luzyanina O.A. Diagnostics of soils of different altitudinal vegetation belts in the Middle Urals according to group composition of iron compounds // *Geogr. Nat. Resour.* – 2016. – V. 37, No 1. – P. 71–78. – doi: 10.1134/S1875372816010108.
42. Орлов Д.С., Садовникова Л.К. Химия почв. – М.: Высш. шк., 2005. – 558 с.
43. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.
44. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: в 6 кн. – М.: Недра-Экология, 1994–1997.
45. Бартковьяк А., Леманович Я., Кобиерский М. Содержание макро- и микроэлементов и активность фосфатаз в почвах при различных технологиях выращивания растений // *Почвоведение*. – 2015. – № 12. – С. 1489–1499. – doi: 10.7868/S0032180X15120035.
46. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпеица И.И. Глинистые минералы в почвах. – Тула: Гриф и К, 2005. – 336 с.

47. *Pettijohn F.J., Bastron H.* Chemical composition of argillites of the Cobalt series (Precambrian) and the problem of soda-rich sediments // *Bull. Geol. Soc. Am.* – 1959. – V. 70, No 5. – P. 593–600. – doi: 10.1130/0016-7606(1959)70[593:CCOAOТ]2.0.CO;2.

Поступила в редакцию
30.06.2020

Самофалова Ираида Алексеевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры почвоведения

Пермский государственный аграрно-технологический университет
ул. Петропавловская, д. 23, г. Пермь, 614990, Россия
E-mail: *samofalovairaida@mail.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2020, vol. 162, no. 4, pp. 592–611

doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611

**Diagnostics of Soil Formation and Weathering Processes
Based on the Content of Alkaline and Alkaline Earth Macroelements
in Soils of the Middle Urals (Basegi Ridge)**

I.A. Samofalova

Perm State Agro-Technological University, Perm, 614000 Russia
E-mail: *samofalovairaida@mail.ru*

Received Juny 30, 2020

Abstract

In this paper, the geochemical indicators based on the concentrations of alkaline and alkaline earth macroelements (K, Na, Ca, Mg), as well as aluminum and silicon, were studied for the territory of the Basegi Ridge on the western slope of the Middle Urals. The basin of the Malyi Basegi River on the Northern Basegi Mountain was singled out as a key site. The bulk composition of all elements was measured with the help of X-ray fluorescence. The calculations of the indices given above show that the concentrations of alkaline and alkaline earth metals are higher in the soils of the mountain-forest belt, while K₂O and MgO are dominant in the soils of the golets-subgolets belt. K₂O was found to be evenly distributed in all soils and had a relatively stable concentration. The data obtained revealed that the differentiation of the soil profile by chemical composition depends on the content of K₂O and MgO, which is a sign of brown soil formation. The following geochemical indicators were measured to register the processes of physical and chemical weathering and soil formation: total bulk concentration of Mg + Ca + K (%); CaO/MgO molecular ratio; normalized alkalinity modulus; alumina index; alkaline modulus; plagioclase index of alteration; weathering intensity. Using the calculated bulk concentrations of alkaline and alkaline earth macroelements and the data on chemical heterogeneity of the soil cover in the high-altitude landscapes of the Middle Urals, the evolutionary and genetic features of the soils under consideration were identified.

Keywords: mountain soils, elements, type of profile distribution, entropy, differentiation coefficient, geochemical coefficients, litho-geochemical indices, physical and chemical weathering, high-altitude landscapes

Figure Captions

Fig. 1. Statistical distribution of the coefficients of soil profile differentiation by the concentration of macroelements ($n = 12$).

References

1. Bowen H.I.M. *Environmental Chemistry of the Elements*. London, New York, Acad. Press, 1979. 333 p.
2. Nesbitt Y.W., Young, G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717. doi: 10.1038/299715a0.
3. Nesbitt H.W., Young G.M. Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.*, 1989, vol. 97, no 2, pp. 129–147.
4. Retallack G.J. *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology*. Oxford, Blackwell Sci., 2001. xi + 404 p. doi: 10.1002/9780470698716.
5. Druzhinina O.A. Results of the geochemical study of the cultural layer of the Ryadino-5 archaeological site. *Vestn. Balt. Fed. Univ. im. I. Kanta*, 2012, no. 1, pp. 29–33. (In Russian)
6. Rodionova M.E. Changes in the bulk chemical composition of forest-steppe and steppe soils as a result of their agrogenic transformations. *Fundam. Issled.*, 2012, no. 3, pp. 333–338. (In Russian)
7. Ryabogina N.E., Borisov A.V., Ivanov S.N., Zanina O.G., Savitskii N.M. Natural conditions in the south of the Central Russian Upland in the Khazar times (9th–10th centuries). *Vestn. Arkheol., Antropol., Etnogr.*, 2013, no. 3, pp. 182–194. (In Russian)
8. Kalinin P.I. Using geochemical indicators to study fossil soils of the burial mounts. *Materialy Vseros. nauch. konf. po arkheologicheskomu pochvovedeniyu* [Proc. All-Russ. Sci. Conf. on Archaeological Soil Science]. Pushchino, IFKHiBPP Ross. Akad. Nauk, 2014, pp. 120–123. (In Russian)
9. Samofalova I.A., Luzyanina O.A., Kondratyeva M.A., Mamontova N.V. Elemental composition of soils in undisturbed ecosystems of the Middle Urals. *Vestn. Altai. Gos. Agrar. Univ.*, 2014, no. 5, pp. 67–74. (In Russian)
10. Lisetskii F.N., Marinina O.A. Soil chronoserries and the structure of the Red Book of the Crimean soils. *Krasnaya kniga pochv i ee znachenie dlya okhrany pochvennogo pokrova: Materialy Vseros. nauch. konf.* [The Red Book of Soils and Its Role in Soil Cover Preservation: Proc. All-Russ. Sci. Conf.]. Kostenko I.V. (Ed.). Simferopol, ARIAL, 2015, pp. 110–114. (In Russian)
11. Maslennikova A.V., Deryagin V.V. Geochemical indicators of the Holocene sedimentogenesis conditions in the Urals. *Konf. molodykh uchenykh-2011 "Sovremennye problem geokhimii"* [Proc. Conf. for Young Scientists-2011 "Current Problems of Geochemistry"]. Irkutsk, Inst. Geokhim. im. A.P. Vinogradova Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2011. Available at: <http://conf.ict.nsc.ru/youngconf-2011/ru/reportview/49388>. (In Russian)
12. Kulizhskii S.P., Rodikova A.V. Geochemical differentiation of soils in the basin of Lake Shira. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Biol.*, 2009, no. 3, pp. 103–108. (In Russian)
13. Kalinin P.I., Alekseev A.O., Kudrevatykh I.Yu., Vagapov I.M. Quantitative climatic reconstructions of the Pleistocene based on the study of the Semibalka-2 loess-soil complex (Cis-Azov region). *Vestn. Voronezh. Gos. Univ. Ser. Geol.*, 2016, no. 2, pp. 22–30. (In Russian)
14. Mouraviev F.A., Arefiev M.P., Silantiev V.V., Gareev B.I., Batalin G.A., Urazaeva M.N., Kropotova N.V., Vybornova I.B. Paleogeography of accumulation of the Middle-Upper Permian red mudstones in the Kazan Volga Region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 4, pp. 548–568. (In Russian)
15. Alexandrova A.B., Gordienko T.A., Vavilov D.N., Valiev V.S., Ivanov D.I., Rupova E.H. The contemporary state of soils and mesofauna in the "Golubye Oзера" Nature Preserve of the Republic of Tatarstan. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 1, pp. 101–116. (In Russian)
16. Tuñçay T., Dengiz O. Chemical weathering rates and geochemical-mineralogical characteristics of soils developed on heterogeneous parent material and toposequence. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 583–598.
17. Senol H., Tuñçay T., Dengiz O. Geochemical mass balance applied to the study of weathering and evolution of soils. *Indian J. Geo Mar. Sci.*, 2018, vol. 47, no. 9, pp. 1851–1865.

18. Tyler G. Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol. *Geoderma*, 2004, vol. 119, nos. 3–4, pp. 277–290. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.08.005.
19. Nordt L.C., Driese S.D. New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols. *Geology*, 2010, vol. 38, no. 5, pp. 407–410. doi: 10.1130/G30689.1.
20. Dymov A.A., Zhangurov E.V., Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains. *Catena*, 2015, vol. 131, pp. 140–148. doi: 10.1016/j.catena.2015.03.020.
21. Samofalova I.A. Soil heterogeneity in the Basegi Nature Reserve (Middle Urals). *Proshloe i sovremennoe sostoyanie, prognoz razvitiya geograficheskikh sistem: Materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem* [The Past and Present State and the Forecast of Development of Geographical Systems: Proc. All-Russ. Sci. Conf. Int. Participation]. Kirov, Izd. VyatGGU, 2014. pp. 159–163. (In Russian)
22. *Letopis' prirody zapovednika "Basegi" za 1996 g.* [Nature Records of the Basegi Nature Reserve for 1996]. Book 10. Gremyachinsk, 1997. 310 p. (In Russian)
23. Gorchakovskii P.L. *Rastitelnyi mir vysokogornogo Urala* [Plants of the Highland Urals]. Moscow, Nauka, 1975. 284 p. (In Russian)
24. *Polevoi opredelitel' pochv* [Field Guide to Soils]. Moscow, Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva, 2008. 182 p. Available at: http://esoil.ru/images/stories/pdf/Field_guide.pdf. (In Russian)
25. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and Practice of Chemical Soil Analysis]. Vorob'eva L.A. (Ed.). Moscow, GEOS, 2006. 400 p. (In Russian)
26. Antonova Z.P., Skalaban V.D., Suchilkina L.G. Measuring the humus content in soils. *Pochvovedenie*, 1984, vol. 11, no. 5, pp. 130–133. (In Russian)
27. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of Lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka, 2000. 479 p. (In Russian)
28. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2.
29. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 1995, vol. 23, no. 10, pp. 921–924. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2.
30. Alekseev A.O., Alekseeva T.V. *Oksidogenez zheleza v pochvakh stepnoi zony* [Iron Oxidogenesis of in Steppe Soils]. Moscow, GEOS, 2012. 204 p. (In Russian)
31. Samofalova I.A. Using the basin approach to study the differentiation of vegetation and soil cover (Basegi Ridge, Middle Urals). *Geogr. Priir. Resur.*, 2020, no. 1. pp. 175–184. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-1(175-184). (In Russian)
32. Targul'yan V.O. *Pochvoobrazovanie i vyvetrivanie v kholodnykh gumidnykh oblastiakh* [Soil Formation and Weathering in Cold Humid Areas]. Moscow, Nauka, 1971. 268 p. (In Russian)
33. Airapetyan T.A., Chernyakhovsky A.G., Gradusov B.P., Bal'yan A.S. Primary soil-eluvial formations of major bioclimatic belts in the Aragats massif. *Izv. Akad. Nauk Arm. SSR. Nauki Zemle*, 1975, no. 2, pp. 78–93. (In Russian)
34. Samofalova I., Luzyanina O., Maulina E., Kulkova L. Features soil mountain-taiga zone the Middle Urals. *Izdir Univ. J. Inst. Sci. Technol.*, 2012, vol. 2 Ek:A, no. 2 Sp:A, pp. 93–100.
35. Samofalova I.A., Luzyanina O.A. Ecological and genetic description of soils in the mountain-forest belt of the Middle Urals. *Izv. Samar. Nauchn. Tsentra Ross. Akad. Nauk*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 1426–1431. (In Russian)
36. Samofalova I. Genetic characteristics of brown forest soils on the Middle Urals. *Am. J. Environ. Prot.*, 2015, vol. 4, no. 3-1, pp. 148–156.
37. Samofalova I.A., Kondrat'eva M.A. Buffering of mountain soils in the subalpine belt against acids (Basegi Nature Reserve). *Permsk. Agrar. Vestn.*, 2016, no. 3, pp. 94–103. (In Russian)
38. Samofalova I.A. Soil diversity of low-mountain landscapes and peculiarities of their formation on the western macroslope of the Middle Urals (Basegi Nature Reserve). *Permsk. Agrar. Vestn.*, 2017, no. 3, pp. 10–17. (In Russian)
39. Samofalova I.A. Soil diversity of tundra and golets landscapes in the Basegi Nature Reserve. *Geogr. Vestn.*, 2018, no. 1, pp. 16–28. (In Russian)

40. Samofalova I.A., Rogova O.B., Luzyanina O.A., Savichev A.T. Geochemical features of the distribution of macroelements in the soils of undisturbed landscapes of the Middle Urals (based on the Basegi Nature Reserve)]. *Byull. Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva*, 2016, vol. 85, pp. 56–76. (In Russian)
41. Samofalova I.A., Rogova O.B., Luzyanina O.A. Diagnostics of soils of different altitudinal vegetation belts in the Middle Urals according to group composition of iron compounds. *Geogr. Nat. Resour.*, 2016, vol. 37, no. 1, pp. 71–78. doi: 10.1134/S1875372816010108.
42. Orlov D.S., Sadovnikova L.K. *Khimiya pochv* [Soil Chemistry]. M., Vyssh. Shk., 2005. 558 p. (In Russian)
43. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimicheskie indicatory litogeneza (litologicheskaya geokhimiya)* [Geochemical Indicators of Lithogenesis (Lithological Geochemistry)]. Syktyvkar, Geoprint, 2011. 742 p. (In Russian)
44. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov* [Ecological Geochemistry of Elements]. Moscow, Nedra-Ekologiya, 1994–1997. (In Russian)
45. Bartkowiak A., Lemanowicz J., Kobierski M. The content of macro- and microelements and the phosphatase activity of soils under a varied plant cultivation technology. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 1354–1360. doi: 10.1134/S1064229315120030.
46. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I. *Glinistye mineraly v pochvakh* [Clay Minerals in Soils]. Tula, Grif i K, 2005. 336 p. (In Russian)
47. Pettijohn F.J., Bastron H. Chemical composition of argillites of the Cobalt series (Precambrian) and the problem of soda-rich sediments. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1959, vol. 70, no. 5, pp. 593–600. doi: 10.1130/0016-7606(1959)70[593:CCOАOT]2.0.CO;2.

⟨ **Для цитирования:** Самофалова И.А. Диагностика процессов почвообразования и выветривания по содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов в почвах Среднего Урала (хребет Басеги)// Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 4. – С. 592–611. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611. ⟩

⟨ **For citation:** Samofalova I.A. Diagnostics of soil formation and weathering processes based on the content of alkaline and alkaline earth macroelements in soils of the Middle Urals (Basegi Ridge). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 4, pp. 592–611. doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611. (In Russian) ⟩