УДК 631.4

**DOI:** 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

## Ссылки для цитирования:

Ахметова Г.В. Геохимические особенности почв волнистой озерноледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 53-82. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

#### Cite this article as:

Akhmetova G.V., Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 53-82, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

# Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии

© 2019 г. Г. В. Ахметова

Институт леса КарНЦ РАН, Россия, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, https://orcid.org/0000-0003-0708-369X, e-mail: <u>akhmetova@krc.karelia.ru</u>.

Поступила в редакцию 30.08.2019, после доработки 28.10.2019, принята к публикации 18.12.2019

Резюме: Проведены исследования геохимически сопряженного ряда иллювиально-железистый подзол иллювиальножелезистый глеевый - торфяная глеевая почва), сформированных в условиях распространения волнистой озерно-ледниковой равнины среднетаежной подзоны Карелии. Изучение окислительновосстановительных условий показало, что они меняются окислительных в автоморфных почвах до восстановительных в почвах позиций. аккумулятивных Рассчитаны И проанализированы коэффициенты, особенности геохимические характеризующие направления миграции в исследуемых аккумуляции и Внутрипрофильное распределение кремнекислоты большинства И полуторных окислов в изучаемых почвах носит типичный для подзолов характер. В подзолистых горизонтах почв транзитных позиций, по сравнению с автоморфными, происходит более интенсивный вынос элементов, а в альфегумусовых горизонтах отмечается накопление алюминия, железа, титана и фосфора. Для всех почв характерен дефицит большинства микроэлементов, по сравнению с фоновыми значениями, очень низкие коэффициенты концентрации получены для никеля, кобальта, марганца. Содержание меди, а в некоторых случаях и цинка, находится на уровне фоновых значений. Распределение изучаемых элементов по профилю подзолов происходит по аккумулятивноэлювиально-иллювиальному типу, но наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. В почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для транзитных ландшафтов характерна более почв интенсивная дифференциация микроэлементов. Тип латерально-миграционной дифференциации катены – транзитно-элювиальный, то есть наблюдается изучаемыми элементами подчиненных почв относительно автономных. Это связано с природными условиями территории исследования: слабым уклоном поверхности, однородными песчаными почвообразующими породами, невысокой гумусностью почв.

*Ключевые слова:* лесные почвы, валовой состав, микроэлементы, радиальная миграция, латеральная миграция.

## Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia

#### G. V. Akhmetova

Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the RAS, 11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-0708-369X, e-mail: akhmetova@krc.karelia.ru.

Received 30.08.2019, Revised 28.10.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The geochemically conjugate series of soils (Albic Podzol – Albic Podzol Gleyc – Hystosol) formed on an undulating glaciolacustrine plain in the middle taiga of Karelia was investigated. Surveys for redox conditions showed them to vary from oxidizing in automorphic soils to reducing in soils occupying accumulation-favoring locations. The geochemical coefficients descriptive of the features of accumulation and directions of migration in the studied soils were calculated and analyzed. The distribution of silicic acid and a majority of sesquioxides inside the profile of the studied soils is typical of podzols. The podzolic horizons of the soils occupying interstitial positions have a faster outmigration of elements than in automorphic soils, while their Al-Fe-humic horizons accumulate aluminum, iron, titanium and phosphorus. All the soils are deficient in a majority of microelements as compared to their

background levels; very low concentrations were determined for nickel, cobalt and manganese. The content of copper and sometimes zinc is at the background level. The distribution of the studied elements across the soil profile follows the accumulation-eluviation-illuviation pattern, but the scope of variation in the migration of elements varies among topographic positions. In well-drained locations microelements are quite monotonously distributed through the lower part of the soil profile, while soils in transitional landscapes have a higher differentiation of microelements. The differentiation of the catena through lateral migration is of the transient eluviation type, i.e. soils in lower-lying positions are poorer in the studied elements than soils in automorphic positions. This pattern is due to the natural characteristics of the area: low surface slope, homogeneous sandy parent material, low humus content in soil.

*Keywords:* forest soils, bulk deposition, trace elements, radial migration, lateral migration.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные направления изучения содержания и поведения химических элементов в различных объектах природы являются следствием возрастающего антропогенного воздействия на все сферы планеты (Водяницкий и др., 2012; Добровольский, 1997; Касимов, Власов, 2015). Наибольшее внимание уделяется тяжелым металлам в связи с их важной ролью в технологических процессах (Добровольский, 1997; Рассеянные..., 2004; Barsova et al., 2019). Специфика химического состояния почв всегда вызывала особый интерес, что проявляется в многочисленных работах по геохимии почв (Глазовская, 1999; Ильин и др., 2003; Кашулина, 2018; Лянгузова, 2016; Сысо, 2007; Lado et al., 2008; Evseev, Krasovskay, 2018). Повышенное внимание к почвам связано с тем, что она является наиболее чувствительным индикатором изменений ландшафтно-геохимических условий, происходящих как вследствие природных изменений среды, так и из-за техногенной нагрузки (Добровольский, 1997; Davydova, 2014; Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

В настоящее время актуальной темой во многих отечественных и зарубежных исследованиях становится определение фоновых количественных показателей содержания химических элементов для выявления уровня загрязнения почв (Безносиков и др.,

2007, 2010; Ильин и др., 2003; Сысо, 2007; Ander et al, 2013; Matschullat et al., 2000). Обосновано использование для определения уровня загрязнения региональных фоновых значений, которые должны характеризовать геохимические особенности строения изучаемых территорий (Касимов, Власов, 2015; Reimann, Caritat., 2005; Reimann, Garrett, 2005).

При геохимической характеристике территории также важно учитывать потоки перемещения веществ, которые связывают все компоненты экосистем (Геннадиев, Касимов, 2004). Миграция элементов в почвах происходит как в вертикальном (внутри профиля), так и в горизонтальном направлениях (боковой, поверхностный сток) (Касимов и др., 1994; Кузьмин, 2000; Яшин и др., 2003). Степень передвижения или миграции химических элементов в значительной степени обусловливается наличием геохимических барьеров, способствующих их осаждению, отложению и накоплению (Алексеенко, 2003; Кузьмин, 2000; Перельман, Касимов, 1999).

Ландшафтно-геохимические исследования с подробным исследованием геохимической структуры таежных экосистем, изучение процессов миграции химических элементов в их компонентах активно проводились и проводятся на территории таежных лесов в Сибири (Власова, 2013; Ильин и др., 2003; Сысо, 2007). Исследователями показана значимость комплексного изучения территории с полиэлементным геохимическим анализом компонентов ландшафта и оценкой миграции в нем вещества как главного пути оценки его динамики (Сысо, 2007; Семенов, 1991; Мониторинг..., 2010).

Территория республики Карелия обладает рядом специфических черт, связанных с выходом на поверхность Балтийского щита, сложенного древними докембрийскими породами: сильной изрезанностью рельефа; резкой сменой почвообразующих пород и распространением на большей площади пород легкого гранулометрического состава.

Карелия считается "чистым" регионом, на ее территории мало крупных промышленных предприятий, способных оказывать негативное влияние на компоненты экосистем. Тем не менее в последние годы наблюдается интенсификация вырубки леса, и все

меньше остается территорий с естественным почвенным покровом, что приводит к изменению круговорота химических элементов (Kiikkilä et al., 2014; Richardson et al., 2017). Таким образом, в настоящее время появилась необходимость в проведении почвенных геохимических исследований на особо охраняемых территориях, ценность которых определяется ненарушенностью и представлением естественных, не трансформированных деятельностью человека природных условий.

Цель статьи — выявление особенностей геохимического состава сопряженного ряда почв ландшафта волнистой песчаной озерно-ледниковой равнины среднетаежной подзоны Карелии и определение основных закономерностей процессов миграции и аккумуляции макро- и микроэлементов в почвах сопряженных элементарных геохимических ландшафтов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования юго-восточной проводились В Государственного заповедника "Кивач" (рис. 1), в районе распространения такого типа местности как волнистая песчаная озерно-ледниковая равнина. Кристаллическое основание перекрыты покрывающая морена гравийно-галечными его песчаными озерными наносами, рельеф формируют высокие песчано-галечные гряды – озы, высота которых составляет 20 м (Демидов и др., 2006). Понижения на озерно-ледниковой равнине заняты верховыми и переходными болотами и ламбами. Данный тип местности широко распространен на территории Карелии, он отличается низким классом бонитета сосновых (лишайниковых И зеленомошных). a также белностью напочвенного растительного покрова.

Почвы формируются на разнозернистых слоистых песках, которые хорошо сортированы и представлены фракциями крупного и среднего песка, содержание илистой фракции очень мало, не превышает 2%.

Пробные площади сопряженных заложены ряду элементарных геохимических ландшафтов (Полынов, 1956; Авессаломова, 1987): автоморфных (элювиальных) OT на транзитные (трансэлювиальные водоразделах, через И

трансэлювиально-аккумулятив-ные) на различных участках склонов к подчиненным (супер-аквальным или аккумулятивным) элементам рельефа (рис. 2).



**Рис. 1.** Расположение пробных площадей (красными точками указаны места заложения геохимических профилей).

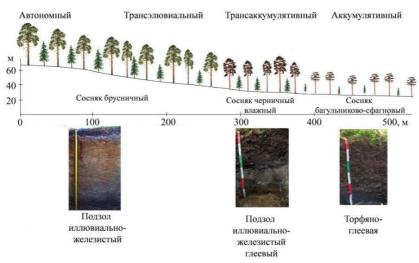
Fig. 1. Location of sample plots (red points show location of geochemical profiles).

Классификационная принадлежность почв определялась согласно Классификации и диагностике почв России

(Классификация..., 2004). Отбор проб проводился по генетическим горизонтам из почвенных разрезов, заложенных в трехкратной повторности в пределах каждого элементарного геохимического ландшафта.

Определялись следующие показатели:

- валовой анализ минеральной части почвы и ее физикохимические свойства (рН в водной и солевой вытяжках, сумма обменных оснований и степень насыщенности основаниями, содержание подвижных форм фосфора и калия, органического углерода и валового азота) в соответствии с общепринятыми методами (Аринушкина, 1970). Определение содержания полуторных окислов в органогенных горизонтах проводилось после их озоления;
- окислительно-восстановительный потенциал почвы потенциометрическим методом;
- содержание микроэлементов методом атомно-адсорбиционной спектрофотометрии при растворении в смеси азотной, плавиковой и серной кислот.



**Рис. 2.** Сопряженный ряд почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины.

Fig. 2. Catena of undulating glaciolacustrine sandy plain.

Рассчитывались следующие геохимические коэффициенты (Авессаломова, 1987; Глазовская, 2002; Перельман, Касимов, 1999), которые позволяют определять направленность процессов накопления-выноса химических элементов:

- *Кс* коэффициент концентрации соотношение содержания химического элемента в исследуемой почве (Сі) к его фоновому значению (Сфі). В качестве фоновых показателей использовались данные по среднему содержанию химических элементов в почвах Карелии в лесной подстилке и подподстилочных горизонтах (Федорец и др., 2008).
- Kr коэффициент элювиально-аккумулятивный или радиальной дифференциации Kr = Ci / Cinn, где Ci содержание химического элемента в том или ином генетическом горизонте почвы, а Cinn содержание в почвообразующей породе.
- *Геохимический индекс или формула почв* составлен на основе рассчитанных Кс. Формула почв элементарного ландшафта, представляет собой вид неправильной дроби: на месте целого числа указывается класс ландшафта, в числителе мигрирующие элементы, в знаменателе элементы, осаждающиеся на геохимических барьерах, после дроби указываются элементы, мигрирующие и осаждающиеся в равной степени.
- Kn коэффициент латеральной миграции отношение содержания химического элемента в изучаемом подчиненном ландшафте (Сп.л.) к его содержанию в автономном ландшафте (Са.л.): Kn = Cn.n. / Ca.n.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ha автоморфных хвишивоп В элювиальных трансэлювиальных элементарных геохимических ландшафтах на флювиогляциальных сортированных песчаных мощных отложениях под сосняками брусничными формируются подзолы иллювиально-железистые песчаные. Данные почвы широко распространены на территории Карелии и могут считаться фоновыми (Разнообразие..., 2006), они имеют типичное для подзолов строение генетического профиля. На поверхности образуется мощная лесная подстилка (горизонт О), на границе перехода лесной подстилки минеральную часть В

встречаются остатки углей небольшого размера. Подзолистый горизонт морфологически выражен четко, но имеет небольшую мощность -2-3 см.

Подзолы имеют легкий гранулометрический состав, преобладают песчаные фракции, содержание илистой фракции очень низкое. Они хорошо дренированы и имеют высокую степень аэрации, в них преобладают окислительные процессы.

Показатели кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий во многом определяют тенденции миграции химических элементов (Перельман, Касимов, 1999; Husson O., 2012). Значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в хорошо аэрированных верхних органогенных горизонтах составляют 500–600 мВ, в минеральных горизонтах эта цифра снижается до 450–470 мВ, таким образом, полученные результаты свидетельствуют о преобладании окислительных условий (Сердобольский, 1965).

Почва имеет кислую реакцию, самая низкая величина р $H_{\text{водн.}}$  = 4 характерна для органогенного горизонта, в нижней части профиля этот показатель выше – р $H_{\text{водн.}}$  = 5.6–5.7 и соответствует слабокислой реакции среды. Обменная кислотность сильно варьирует: от р $H_{\text{KCl}}$  = 3.0 в подстилке до 4.7–4.9 в нижней части профиля, — что свидетельствует об интенсивно протекающих процессах трансформации минералов.

Минеральные горизонты подзола иллювиально-железистого отличаются очень низким содержанием органического вещества, азота и остальных элементов питания растений (табл. 1).

В нижней части склона оза неширокой полосой в периферийной части болота под черничными влажными микрогруппировками соснового древостоя подзолы иллювиальножелезистые сменяются полугидроморфными почвами – подзолами иллювиально-железистыми глеевыми.

**Таблица 1.** Физико-химические свойства почв ландшафта озерно-ледниковой равнины **Table 1.** Physico-chemical properties of soils of undulating glaciolacustrine sandy plain

Гори- зонт	Мощ- ность, см	рН ксі	pH H <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	$\mathbf{V}^*$	Гумус	N	Зольность **/ппп***	Сумма фракций < 0.01 мм	
				мг/1	00 г				%		
Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.											
О	0–8	3.1	4.0	42.8	82.2	3.5	62.5	0.54	31.8	-	
Е	8-17 (25)	3.3	4.5	2.4	1.2	0	0.2	0.14	0.5	8.1	
BF	17 (25) -30	4.4	5.0	27.7	0.9	0	1.9	0.08	4.4	6.4	
BF2	30–46	4.9	5.5	9.8	0.6	0	0.4	0.06	1.2	4.8	
BC	46–70	4.8	5.7	12.3	0.8	26.3	0.1	0.04	0.7	3.6	
C1	ниже 70	4.7	5.6	5.7	0.4	17.2	0.3	0.02	0.6	3.0	
	Транзитный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевый										
OT	0–9	3.0	3.8	40.2	100.0	33.7	83.7	1.29	52.1	-	
T1	9–15	3.5	4.3	-	ı	-	78.5	1.00	44.2	-	
TAh	15-20	3.6	4.5	-	-	-	53.01	0.95	41.6	-	
E	20	4.5	5.3	1.0	1.7	14.7	0.60	0.08	1.2	5.5	
BFg	ниже 50	4.7	5.8	34.0	1.5	13.5	0.8	0.09	2.1	6.0	
	Аккумулятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва										
OT	0–15	3.2	3.8	21.2	92.3	0	85.51	1.00	2.9	-	
T1	15-25	3.2	3.8	23.8	110.0	0	80.13	1.07	5.6	-	
T2	25-40	3.4	4.0	18.9	84.6	9.6	82.73	1.75	7.8	-	
T3	40–50	3.8	4.6	10.4	30.8	3.0	84.52	1.75	8.1	=	
G1	50-60	4.1	4.8	-	-	-	9.54	-	11.6	=	
G2	ниже 60	4.5	4.9	-	-	-	9.02	-	11.8	-	

**Примечание.** \*- степень насыщенности основаниями; \*\*- зольность дана для органогенных горизонтов O, OT, TAh и T; \*\*\*- потеря при прокаливаниями, дана для минеральных горизонтов.

В напочвенном покрове появляются сфагновые мхи, что обуславливает развитие мощной оторфованной подстилки (более 20 см), состоящей из слоев торфа разной степени разложения. Между торфяным слоем и мощным подзолистым горизонтом (15—20 см) формируется органоминеральный слой (горизонт ТАh) темного, почти черного цвета, он имеет небольшую мощность (1—3 см), и на границе перехода к минеральной части почвы отмечается наличие остатков углей. Нижняя часть профиля заливается грунтовыми водами (с 40–60 см). Величина Еh в оторфованной подстилке варьирует в пределах 400–500 мВ. В нижней части профиля этот показатель снижается до 350 мВ, что свидетельствует о переходных условиях — от окислительных к восстановительным.

Почвы кислые, самые низкие показатели рН характерны для оторфованной подстилки (р $H_{\text{KCl}}=3.0\text{--}3.5$ ), вниз по профилю значения рН повышаются до 4.6–4.8. Также как и для почвы, рассмотренной ранее, отмечается невысокий уровень содержания органического вещества и изучаемых химических элементов в минеральных горизонтах.

В подчиненных позициях рельефа в условиях заболоченного сосняка багульнико-сфагнового формируются торфяные болотные и торфяно-глеевые почвы переходного типа. Профиль почв представляет собой слои торфа разной степени разложения. Грунтовые воды находятся близко к поверхности, и во влажные годы профиль почвы полностью заливается.

Торфяные почвы имеют кислую реакцию среды (р $H_{водн.}$  – от 4.0 до 4.6), наименее кислыми являются глеевые горизонты – р $H_{водн.}$  – 4.8–4.9. Величина обменной кислотности в торфяных горизонтах варьирует от 3.2 до 3.8, уменьшаясь в зависимости от степени разложения торфа, в глеевых горизонтах – р $H_{KCI}$  = 4–4.5.

Почвы бедны органическим веществом. Зольность торфа низкая (2.7–3.3%) в верхних слоях торфа, состоящего из почти неразложившегося сфагнового мха. Нижние слои торфа более высокозольные, в них встречаются остатки осоки средней степени разложения, содержание золы увеличивается до 8–9%.

Торфяные почвы являются неоднородной геохимической системой, условия миграции в них с глубиной резко меняются, и

протекают реакции окисления и восстановления различной природы (Инишева, 2010, 2016). Очес и верхние рыхлые слаборазложившиеся оторфованные горизонты характеризуются окислительными условиями (Eh = 400–500 мВ). В нижележащих слоях торфа, на глубине примерно 30–40 см, Eh уменьшается до 250–350 мВ, а на уровне ниже 50–70 см его величина снижается еще сильнее (менее 200 мВ), то есть преобладают восстановительные условия.

Типоморфным, то есть определяющим направление миграции элементов, для почв автоморфного и транзитного ландшафтов является катион водорода  $H^+$ , таким образом, такие почвы имеют кислый класс водной миграции, который характеризуется высокой миграционной способностью большинства элементов-металлов. В глеевых горизонтах почв аккумулятивного ландшафта условия миграции меняются на восстановительные глеевые, железо изменяет валентность и становится типоморфным.

Валовой состав изучаемых подзолов имеет характерную для всех подзолов четкую дифференциацию горизонтов по содержанию кремнекислоты  $SiO_2$ , оксидов железа и алюминия  $R_2O_3$  (табл. 2). Изучаемые почвы отличаются очень высоким содержанием кремнекислоты — более 80%. На втором месте по содержанию находится оксид алюминия (9–14%). В сумме эти два оксида составляют более 90%, на остальные элементы приходится менее 10%. Распределение железа по профилям подзолов, по сравнению с алюминием, носит более контрастный характер, что также отмечается и в исследовании <u>Урусевской И.С. (2017)</u>. При сопоставлении с подзолами Кольского полуострова, развитыми на песчаных отложениях (<u>Переверзев, 2009</u>), можно отметить, что изучаемые почвы отличаются более "бедным" химическим составом.

В лесной подстилке автоморфных почв происходит накопление большинства элементов, особенно интенсивно аккумулируется кальций и фосфор. В подзолистом горизонте наблюдается вынос большинства полуторных окислов со средней степенью интенсивности, в альфегумусовом горизонте эти процессы переходят в накопление слабой степени.

**Таблица 2.** Валовой состав почв ландшафта озерно-ледниковой равнины, % **Table 2.** Bulk composition of soils of undulating glaciolacustrine sandy plain, %

Гори-	$SiO_2$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	$Al_2O_3$	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	$P_2O_5$	$TiO_2$	SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{\mathrm{SiO}_2}{\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3}$	$\frac{\mathrm{SiO}_2}{\mathrm{R}_2\mathrm{O}_3}$	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
	Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.												
О	73.2	2.9	13.2	4.1	1.9	0.7	1.8	1.3	0.5	9	67	8	7
Е	81.9	3.0	10.0	1.9	0.3	0.2	2.4	0.1	0.3	14	74	12	5
BF	80.4	2.1	11.0	1.6	1.5	0.3	3.1	0.1	0.3	12	101	11	8
BF2	80.0	2.3	10.3	1.6	1.5	0.7	3.2	0.1	0.2	13	93	12	7
BC	81.0	1.7	10.2	1.5	1.6	0.4	3.1	0.0	0.2	14	124	12	9
С	81.6	1.6	9.8	1.6	1.5	0.5	2.8	0.1	0.2	14	133	13	9
	Транзитный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевый.												
OT	70.8	2.3	11.2	5.3	2.3	1.5	1.7	2.0	0.3	11	82	10	8
TAh	77.6	1.7	9.7	3.2	1.4	1.0	1.8	1.5	0.3	14	122	12	9
Е	86.8	0.4	8.4	0.6	1.3	0.1	1.8	0.0	0.1	18	564	17	32
Bh1	78.6	1.4	14.1	1.2	1.6	0.6	2.2	0.2	0.3	10	155	9	16
Bh2	80.4	1.2	12.6	1.0	1.6	0.5	2.3	0.1	0.2	18	173	10	16
Bg	81.6	1.1	10.9	1.0	1.6	0.6	2.4	0.0	0.2	13	198	12	16
BCg	82.5	1.0	10.4	1.1	1.6	0.4	2.4	0.0	0.1	14	224	13	17
Аккумулятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва.													
OT	59.2	4.8	12.3	9.5	3.6	3.0	0.7	н. д.	н. д.	8	33	7	4
T1	68.1	5.6	10.7	4.1	1.8	0.7	0.9	н. д.	н. д.	11	33	8	3
T2	56.4	3.7	19.9	5.8	1.3	0.9	0.8	н. д.	н. д.	5	40	4	8
G2	72.6	1.5	11.2	1.3	1.5	0.7	1.4	н. д.	н. д.	11	127	10	11

Примечание. н. д. – нет данных.

В нижних горизонтах не наблюдается дифференциации содержания элементов относительно почвообразующей породы, то есть нижняя часть профиля слабо преобразована почвообразовательными процессами, что также подтверждает равномерное распределение титана (Самофалова, 2016).

В мощной оторфованной подстилке (особенно в нижней гумусированой части) подзола иллювиально-железистого глеевого происходит интенсивное накопление большинства полуторных окислов. Также наблюдается усиление процессов аккумуляции фосфора и кальция наряду с увеличением степени заторфованности подстилки.

В подзолистом горизонте почв выявлен более интенсивный вынос элементов, по сравнению с почвами автоморфных позиций, а для иллювиального горизонта подзола глеевого отмечаются высокие коэффициенты накопления элементов, особенно алюминия, железа, титана и фосфора.

Составлены ряды элементов по возрастающему значению рассчитанных элювиально-аккумулятивных коэффициентов (Kr) (табл. 3). По ним можно судить о порядке относительного выноса или накопления элементов в различных горизонтах почв.

Можно отметить, что формирующийся в почвах транзитных ландшафтов иллювиальный горизонт представляет собой сорбционный барьер большей мощности, чем таковой в автономных почвах. Это связано с более интенсивным процессом разрушения минеральных частиц в подзолистом горизонте, за счет чего происходит вынос большинства элементов (алюминия, железа, магния, фосфора и титана) из этого слоя и их осаждение в иллювиальном горизонте.

Для всех изучаемых почв характерен дефицит большинства микроэлементов, коэффициенты концентрации говорят об обедненности почв микроэлементами при их сопоставлении с фоновыми значениями (Федорец, 2008).

**Таблица 3.** Ряды элементов по значению Kr в горизонтах почв элементарных геохимических ландшафтах (1 -автономный, 2 -транзитный, 3 -аккумулятивный)

**Table 3.** Rows of elements according Kr value in soils' horizons of elementary landscapes (1 – automorphous, 2 – transite, 3 – accumulative)

Горизонты О (ОТ)										
1	Na <sub>2</sub> O 0.7	SiO <sub>2</sub> 0.9	<u>K<sub>2</sub>O</u> 1.3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.3	MgO 1.4	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.8}$	$\frac{\text{TiO}_2}{2.3}$	<u>CaO</u> 2.6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 12.9	
2	Na <sub>2</sub> O 0.7	SiO <sub>2</sub> 0.9	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> 1.1	<u>K<sub>2</sub>O</u> 1.5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.3	<u>TiO<sub>2</sub></u> 2.6	MgO 3.8	<u>CaO</u> 4.8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 20.0	
3	Na <sub>2</sub> O 0.5	SiO <sub>2</sub> 0.8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.1	<u>K<sub>2</sub>O</u> 2.4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3.2	MgO 4.2	<u>CaO</u> 7.3	-	-	
Горизонты Е										
1	<u>K<sub>2</sub>O</u> 0.2	MgO 0.4	Na <sub>2</sub> O 0.8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0.9	<u>CaO</u> 1.2	SiO <sub>2</sub> 1.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.0	<u>TiO<sub>2</sub></u> 1.7	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.8	
2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0.3	MgO 0.3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.4	<u>CaO</u> 0.6	<u>K<sub>2</sub>O</u> 0.8	Na <sub>2</sub> O 0.8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.8	<u>SiO<sub>2</sub></u> 1.1	<u>TiO</u> <sub>2</sub> 1.2	
	Горизонты ВF									
1	MgO 0.4	<u>K<sub>2</sub>O</u> 1.0	SiO <sub>2</sub> 1.0	<u>CaO</u> 1.0	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> 1.1	<u>Na<sub>2</sub>O</u> 1.1	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1.1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.3	<u>TiO</u> <sub>2</sub> 1.7	
2	Na <sub>2</sub> O 0.9	SiO <sub>2</sub> 1.0	<u>K<sub>2</sub>O</u> 1.0	<u>CaO</u> 1.1	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> 1.4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.4	MgO 1.5	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1.5	<u>TiO<sub>2</sub></u> 2.6	

На основе рассчитанных Кс построены геохимические формулы почв элементарных ландшафтов (табл. 4), которые позволяют выявить типоморфные геохимические процессы, определяющие ландшафтно-геохимическую дифференциацию территории, оценить недостаток или избыток изучаемых элементов, а также судить о характере их миграции и аккумуляции (Перельман, 1999).

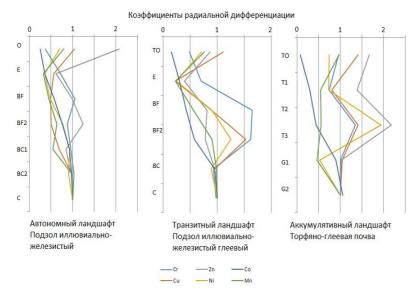
Получены очень низкие значения Кс никеля, кобальта, марганца в изучаемых почвах. Для хрома выявлены более высокие Кс, однако они также меньше единицы (Кс < 0.5-0.7). Данная особенность связана с тем, что почвообразующие и подстилающие породы изучаемых почв представлены песчаными флювиогляциальными отложениями, которые характеризуются очень низкими концентрациями изучаемых микроэлементов (Тойкка, 1973). Тем не менее отмечается, что содержание меди, а в некоторых случаях и цинка, находится на уровне фоновых значений.

Расчет коэффициентов радиального распределения (Кг) микроэлементов в профилях рассматриваемых почв позволили выявить закономерности радиальных процессов накоплениявыноса элементов. Направления радиальной миграции элементов в изучаемых почвах достаточно контрастные и имеют различные закономерности, связанные с положением в рельефе. Для почв автоморфных и транзитных фаций отмечается общая закономерность накопления в лесной подстилке микроэлементов-биогенов (рис. 3). Наиболее активно в подстилке накапливается цинк, его Кг достигает 3-4, что свидетельствует об активном участии цинка в биогенных процессах. Отмечается значительное снижение содержания рассматриваемых элементов с увеличением степени оторфованности подстилки, что связано с особенностью опада, а также с активным выщелачиванием их из растительных остатков в почвенные и болотные воды. Существенное снижение концентрации марганца в почвах подчиненных позиций связывают с его большей растворимостью при смене окислительной реакции среды на восстановительную (Безносиков, 2010), что способствует его выносу за пределы почвенного профиля.

**Таблица 4.** Геохимические формулы почв катены **Table 4.** Geochemical formulas of soils of catena

Гори- зонт	Геохимическая формула								
Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.									
О	H <sup>+</sup>	Mn (0.3) Ni (0.4) Co (0.5) Cr (0.6)	Cu						
		Zn (1.1)	(1.0)						
Е	$H^+$	Ni(0.1) Cr(0.3) Mn(0.3) Cu (0.4) Co (0.5) Zn (0.6)							
E		<u> </u>							
BF	H <sup>+</sup>	Ni (0.3) Cr(0.4) Co(0.4) Mn (0.6)	Cu						
DГ		Zn (1.3)	(0.9)						
BC	H <sup>+</sup>	Ni (0.4) Cr (0.4) Co (0.5) Mn (0.6) Zn (0.8)	Cu						
ьс	п	<del>_</del>	(0.9)						
	$H^+$	Cr (0.3) Ni (0.4) Co (0.5) Mn (0.6) Zn (0.8)	Cu						
С		<u> </u>	(1.0)						
Тран	зитный л	пандшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевы	й.						
0.00	$H^{+}$	Mn(0.1) Co(0.2) Zn(0.3) Ni(0.3) Cr (0.4) Cu(0.6)							
OT		<del>_</del>	_						
	$H^{+}$	Ni (0.1) Mn (0.1) Cr (0.2) Co (0.2) Zn (0.3) Cu (0.3)	0.4)						
E		<del>_</del>							
	$H^{+}$	Ni (0.2) Mn (0.2) Co (0.2) Cr (0.4) Zn (0.5)	Cu						
BF			(0.9)						
	$H^{+}$	Mn (0.2) Ni (0.2) Cr (0.3) Co (0.3) Cu (0.6) Zn (0.7)							
Cg	$Fe^{2+}$		_						
	Аккум	улятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва.							
		Co (0.1) Ni (0.2) Mn (0.2) Zn (0.4) Cr (0.5) Cu (0.7)							
OT	$H^{+}$		_						
T1	H <sup>+</sup>	Mn (0.1) Co (0.2) Ni (0.2) Zn (0.3) Cr (0.4) Cu (0.4)							
			- —						
	H <sup>+</sup>	Mn (0.1) Co (0.3) Ni (0.4) Zn (0.5) Cu (0.7) Cr (0.7)							
T2									
	H <sup>+</sup>	Ni (0.1) Co (0.2) Cr (0.2) Mn (0.3) Zn (0.7)							
G	Fe <sup>2+</sup>	Cu (1.2)	- —						
		Cu (1.2)							

В минеральных горизонтах подзолов иллювиально-железистых и иллювиально-железистых глеевых преобладают процессы выноса (Kr < 1) большинства микроэлементов. Распределение изучаемых элементов в подзолах происходит по элювиально-иллювиальному типу, что также является характерным для исследуемых почв (Полынов, 1956).



**Рис. 3.** Радиальная дифференциация микроэлементов по горизонтам почв элементарных ландшафтов.

Fig. 3. Radial differentiation of trace elements within soils' horizons in elementary landscapes.

В подзолистом горизонте отмечается активный вынос большинства элементов, в иллювиальных горизонтах на сорбционном барьере происходит слабое накопление цинка и сидерофильных, связанных с железом, микроэлементов – кобальта и никеля.

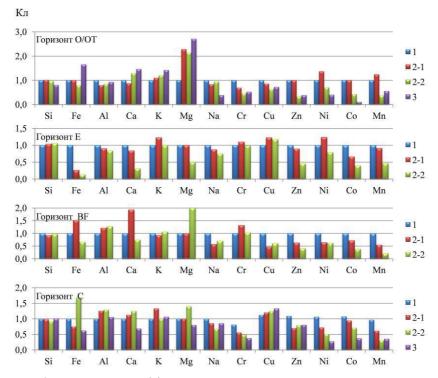
Несмотря закономерности радиальной на сходные миграции элементов в почвах элювиальных и транзитных ландшафтов, наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. подчиненных ландшафтов Для почв характерен. вертикального дренирования, боковой сток, в связи с чем четкого накопления изучаемых микроэлементов (за исключением хрома) в иллювиальных горизонтах подзола иллювиально-железистого глеевого не наблюдается в сравнении с подзолом иллювиальножелезистым. Однако аккумуляция марганца, никеля, меди в

нижней части профиля в подзоле иллювиально-железистом глеевом происходит более интенсивно, что может быть вызвано изменением окислительно-восстановительных условий в сторону восстановительных и формированием окислительного геохимического барьера (Алекссенко, 2003).

Также отмечено, что в почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для почв транзитных ландшафтов характерна более интенсивная дифференциация микроэлементов.

По рассчитанным величинам коэффициента латеральной дифференциации Кл (рис. 4) можно судить о латеральной структуре ландшафтов, которая характеризует геохимическое сопряжение в изучаемых катенах. Отмечается, что процессы латеральной дифференциации изучаемых элементов выражены слабо, и выявлена общая тенденция обеднения почв подчиненных позиций относительно автономных.

Полученные отличаются результатов данные ОТ большинства подобных исследований, где говорится о накоплении химических элементов в почвах подчиненных элементов рельефа (Касимов, 2015; Семенков, 2016). Подобные наблюдения объясняются тем, что для территории исследования характерно однородное строение, рельеф имеет слабый уклон, почвы сформированы на песчаных почвообразующих породах отличаются невысокой гумусностью. В связи с этим устойчивые практически не выносятся из элювиальных ландшафтов, формируется транзитно-элювиальный (с обеднением гетерономных почв относительно автономных) тип латеральномиграционной дифференциации катены (Гаврилова, Касимов, 1989; Геохимия..., 2011).



**Рис. 4.** Латеральная дифференциация химических элементов в горизонтах почв катены (1 - автономный; 2-1 и 2-2 - транзитный; 3 - аккумулятивный ландшафт).

**Fig. 4.** Lateral differentiation of chemical elements in soils' horizons of catena (elementary landscapes: 1 – automorphous; 2–1 and 2–2 – transite; 3 – accumulative).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определяющими условиями ландшафтно-геохимической дифференциации химических элементов в изучаемых почвах являются природные факторы почвообразования: избыточное увлажнение, промывной режим, небольшой уклон поверхности, песчаные озерно-ледниковые почвообразующие породы, их хорошая дренированность, таежная растительность и заторможенное разложение растительных остатков. Анализ валового состава и

содержания микроэлементов в сопряженном ряду почв ландшафта волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии позволил выявить следующие геохимические особенности:

- Почвы автоморфных и транзитных ландшафтов характеризуются окислительными условиями и имеют типичный для среднетаежной подзоны Карелии кислый класс водной миграции. Торфяные почвы, формирующиеся в подчиненных частях рельефа, являются неоднородной геохимической системой, где условия миграции резко меняются с глубиной. Верхние слои торфа характеризуются окислительной средой, а нижние восстановительной и имеют глеевый класс водной миграции.
- В валовом составе почв отмечается типичное для подзолов распределение по профилю кремнекислоты и большинства полуторных оксидов. В подзолистых горизонтах почв транзитных позиций, по сравнению с автоморфными, происходит более интенсивный вынос элементов, а в альфегумусовых горизонтах подзола иллювиально-железистого глеевого выявлены высокие коэффициенты накопления алюминия, железа, титана и фосфора.
- Для всех изучаемых почв характерен дефицит большинства микроэлементов, получены очень низкие коэффициенты концентрации никеля, кобальта, марганца. Почвы автоморфных и транзитных фаций отличаются накоплением в лесной подстилке микроэлементов-биогенов, особенно цинка и марганца, с увеличением степени оторфованности подстилки происходит значительное снижение содержания микроэлементов.
- Радиальное распределение большинства микроэлементов по профилям подзолов носит аккумулятивно-элювиально-иллювиальных характер. Наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. В почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для почв транзитных ландшафтов характерна более интенсивная дифференциация микроэлементов.
- По типу латерально-миграционной дифференциации изучаемые катены относятся к транзитно-элювиальным. Наблюдается уменьшение содержания элементов в ландшафтах по направлению

от автоморфных к аккумулятивным, что определяется природными условиями изучаемой территории.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП "Аналитическая лаборатория" ИЛ КарНЦ РАН.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Авессаломова И.А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1987. 108 с.
- 2. Алексеенко В.А., Алексеенко Л.П. Геохимические барьеры. М: Логос, 2003. 144 с.
- 3. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Издво МГУ, 1970. 488 с.
- 4. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Кондратенок Б.М.* Оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах европейского северо-востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064—1070.
- 5. *Безносиков В.А.*, *Лодыгин Е.Д.*, *Чуков С.Н*. Ландшафтногеохимическая оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах таежной зоны // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия Почвоведение. 2010. Сер. 3. Вып. 2. С. 114–127.
- 6. Власова Н.В. Ландшафтно-геохимическое состояние геосистем средней тайги // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 2. С. 569–572.
- 7. *Водяницкий Ю.В., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Изд-во Почвенного института имени В.В. Докучаева РАСХН, 2012. 305 с.
- 8. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 72 с.
- 9. *Геннадиев А.Н., Касимов Н.С.* Латеральная миграция вещества в почвах и почвенно-геохимические катены // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1447-1461.
- 10. Геохимия ландшафта / под ред. Н.К. Чертко. Минск: БГУ, 2011. 303 с.
- 11. Глазовская М.А. Проблемы и методы оценки эколого-геохимической устойчивости почв и почвенного покрова к техногенным воздействиям // Почвоведение. 1999. № 1. С. 114–124.

- 12. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с. 13. Демидов И.Н., Лукашов А.Д., Ильин В.А. Рельеф заповедника "Кивач" и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. Вып. 10. С. 22–33.
- 14. Добровольский В.В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 431–441.
- 15. Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдина Н.Л., Конарбаева Г.А., Черевко А.С. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550–556.
- $16.\,$ Инишева  $\,$  Л.И.,  $\,$  Голубина  $\,$  О.А. Болотообразовательный процесс. Проведение полевых работ на болотных стационарах. Томск: Изд-во ТГПУ,  $2010.\,80$  с.
- 17. Инишева Л.И., Шайдак Л., Сергеева М. А. Динамика биохимических процессов и окислительно-восстановительное состояние в геохимически сопряженных ландшафтах олиготрофного болота // Почвоведение. 2016. № 4. С. 505–513. DOI: 10.7868/80032180X16040055.
- 18. *Касимов Н.С., Геннадиев А.Н., Лычагин М.Ю.* Пространственные аспекты фонового геохимического мониторинга // Геохимические методы в экологических исследованиях. М., 1994. С. 20–35.
- 19. *Касимов Н.С., Власов Д.В.* Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- 20. *Кашулина*  $\Gamma$ .*М*. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505. DOI: 10.7868/S0032180X1804010X.
- 21. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И.Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- 22. *Кузьмин В.А.* Геохимические барьеры в почвах Прибайкалья // Почвовеление. 2000. № 10. С. 1197—1202.
- 23. *Лянгузова И.В.* Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Пространственно-временная динамика при аэротехногенном загрязнении. Saarbrucken, 2016. 269 с.
- 24. Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем Сибирских регионов. Новосибирск: Наука, 2010. 315 с.
- 25. Переверзев В.Н. Генетические особенности почв на отсортированных песчаных породах разного происхождения (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1052-1060.

- 26. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: "Астрея-2000", 1999. 768 с.
- 27. Полынов Б.Б. Избранные труды. М., 1956. 751 с.
- 28. Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги / отв. ред. Н.Г. Федорец. М.: Наука, 2006. 287 с.
- 29. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2004. 410 с.
- 30. 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") // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 85. С. 57–76. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-85-57-76.
- 31. Семенов Ю.М. Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. Новосибирск: Наука, 1991. 144 с.
- 32. Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 2016. № 3. С. 29–39.
- 33. Сердобольский И.П. Методы определения рН и окислительновосстановительного потенциала при агрохимических исследованиях // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1965. С. 195—244.
- 34. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2007. 277 с.
- 35. *Тойкка М.А., Перевозчикова Е.М., Левкина Т.И., Заварзин А.М, Михкиев А.И., Изергина М.М.* Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.
- 36. *Урусевская И.С.* Почвенные катены цокольно-денудационных равнин лесотундры и северной тайги Кольского полуострова // Почвоведение. 2017. № 7. С. 771–786. DOI: 10.7868/S0032180X17070127.
- 37. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 46 с.
- 38. Яшин И.М., Раскатов В.А., Шишов Л.Л. Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА, 2003. 316 с.
- 39. Ander E.L., Johnson C.C., Cave M.R.A, Palumbo-Roe B., Nathanail C.P., R. Lark M. Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 454–455. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.005.

- 40. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation. A review // Environmental Pollution 2019. Vol. 249. P. 200–207. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.
- 41. *Davydova N.D.*, *Znamenskaya T.I.*, *Lopatkin D.A.* Landscape—Geochemical Approach to Solving Problems of Environmental Pollution // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7. Iss. 3. P. 345–352. DOI: 10.1134/S1995425514030020.
- 42. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Toxic metals in soils of the Russian North // J. Geochem. Explor. 2017. Vol. 174. P. 128–131. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018.
- 43. *Husson O.* Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy // Plant Soil. 2013. Vol. 362. Iss. 1–2. P. 389–417. DOI: 10.1007/s11104-012-1429-7.
- 44. *Jarva J., Tarvainen T., Reinikainen J., Eklund M.*, TAPIR Finnish national geochemical baseline database // Sci. Total Environ. 2010. Vol. 408. Iss. 20. P. 4385–4395. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.050.
- 45. Kiikkilä O., Nieminen T. M. Starr M. Mäkilä M., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L. Leaching of dissolved organic carbon and trace elements after stem-only and whole-tree clear-cut on boreal peatland // Water Air Soil Pollut. 2014. 225:1767. DOI: 10.1007/s11270-013-1767-y.
- 46. *Lado L.R.*, *Hengl T.*, *Reuter H.I.* Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. Geoderma. 2008. Vol. 148. Iss. 2. P. 189–199. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.020">10.1016/j.geoderma.2008.09.020</a>.
- 47. Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C. Geochemical background can we calculate it? // Environ. Geol. 2000. Vol. 39. P. 990–1000. DOI: 10.1007/s002549900084.
- 48. *Reimann C.*, *Caritat P.* Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 337. Iss. 1–3. P. 91–107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011.
- 49. *Reimann C., Garrett R.G.* Geochemical background concept and reality // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 350. P. 12–27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047.
- 50. Richardson J.B., Petrenko C. L., Friedland A.J. Base cations and micronutrients in forest soils along three clear-cut chronosequences in the northeastern United States // Nutr Cycl Agroecosyst. 2017. Vol. 109. P. 161–179. DOI: 10.1007/s10705-017-9876-4.
- 51. *Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D.* Soil Pollution: a Hidden Reality. FAO. Rome, 2018. 142 p. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00130.

#### REFERENCES

- 1. Avessalomova I.A., *Geokhimicheskie pokazateli pri izuchenii landshaftov* (Geochemical features in studies of landscapes), Moskow: Izd-vo MGU, 1987, 108 p.
- 2. Alekseenko V.A., Alekseenko L.P., *Geokhimicheskie bar'ery* (Geochemical barriers), Moskow: Logos, 2003, 144 p.
- 3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Manual to chemical soil analysis), Moskow: Izd-vo MGU, 1970, 488 p.
- 4. Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Kondratenok B.M., Otsenka fonovogo soderzhaniya tyazhelykh metallov v pochvakh evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Assessment of Background Concentrations of Heavy Metals in Soils of the Northeastern Part of European Russia), *Pochvovedenie*, 2007, No. 9, pp. 1064–1070.
- 5. Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Chukov S.N., Landshaftnogeokhimicheskaya otsenka fonovogo soderzhaniya tyazhelykh metallov v pochvakh taezhnoi zony (Landscape-geochemical assessment of heavy metals' background content in soils of taiga zone), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3. Pochvovedenie*, 2010, No. 2, pp. 114–127.
- 6. Vlasova N.V., Landshaftno-geokhimicheskoe sostoyanie geosistem srednei taiga (Soil-geochemical condition of middle taiga geosystems), *Vestnik TGU*, 2013, Vol. 18, Iss. 2, pp. 569–572.
- 7. Vodyanitskii Yu.V., Ladonin D.V., Savichev A.T., *Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami* (Heavy metal contamination of soil), Moskow: Izd-vo Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva RASKhN, 2012, 305 p.
- 8. Gavrilova I.P., Kasimov N.S., *Praktikum po geokhimii landshafta* (Practicum of geochemistry of landscape), Moskow: Izd-vo MGU, 1989, 72 p.
- 9. Gennadiev A.N., Kasimov N.S., Lateral'naya migratsiya veshchestva v pochvakh i pochvenno-geokhimicheskie kateny (Lateral migration of substances in soils and soil-geochemical catenas), *Pochvovedenie*, 2004, No. 2, pp.1447–1461.
- 10. Chertko N. K., Koval'chuk N.K., Khomich V.S., Karpichenko A.A., Zhumar' P.V., Timofeeva T.A., *Geokhimiya landshafta* (Geochemistry of landscape), Minsk: BGU, 2011, 303 p.
- 11. Glazovskaya M.A., Problemy i metody otsenki ekologo-geokhimicheskoi ustoichivosti pochv i pochvennogo pokrova k tekhnogennym vozdeistviyam (Problems and methods of sssessment of the ecogeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts), *Pochvovedenie*, 1999, No. 1, pp. 114–124

- 12. Glazovskaya M.A., *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovanii prirodnykh landshaftov* (Geochemical basis of typology and methodology in natural landscape studies), Smolensk: Oikumena, 2002, 288 p.
- 13. Demidov I.N., Lukashov A.D., Il'in V.A., Rel'ef zapovednika "Kivach" i istoriya geologicheskogo razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v chetvertichnom periode (Relief of the reserve territory "Kivach" and the geological evolution of the northwestern Prionezhie at quaternary time), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, Iss. 10, 2006, pp. 22–33.
- 14. Dobrovol'skii V.V., Biosfernye tsikly tyazhelykh metallov i regulyatornaya rol' pochvy (Biospheric cycles of heavy metals and regulatory role of soil), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, pp. 431–441.
- 15. Il'in V.B., Syso A.I., Baidina N.L., Konarbaeva G.A., Cherevko A.S., Fonovoe kolichestvo tyazhelykh metallov v pochvakh yuga Zapadnoi Sibiri (Background concentrations of heavy metals in soils of southern western siberia), *Pochvovedenie*, 2003, No. 5, pp. 550–556.
- 16. Inisheva L.I., Golubina O.A., *Bolotoobrazovatel'nyi protsess. Provedenie polevykh rabot na bolotnykh statsionarakh* (Mire formation. Fieldwork surveys on mire's permanent study areas), Tomsk: Izd-vo TGPU, 2010, 80 p.
- 17. Inisheva L.I., Sergeeva M.A., Szajdak L., Dynamics of biochemical processes and redox conditions in geochemically linked landscapes of oligotrophic bogs, *Eurasian Soil Science*, 2016, No. 4, pp. 466–474, DOI: 10.7868/S0032180X16040055.
- 18. Kasimov N.S., Gennadiev A.N., Lychagin M.Yu., Prostranstvennye aspekty fonovogo geokhimicheskogo monitoring (Spatial basis of baseline geochemical monitoring), In *Geokhimicheskie metody v ekologicheskikh issledovaniyakh* (Geochemical methods in environmental investigations), Moscow, 1994, pp. 20–35.
- 19. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimii (Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry), *Vestn. Mosk. un-ta, Iss. 5, Geografiya*, 2015, No. 2, pp.7–17.
- 20. Kashulina G.M., Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola Peninsula, *Eurasian Soil Sci.*, No. 51 (4), 2018, pp. 467–478, DOI: 10.7868/S0032180X1804010X.
- 21. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Russian soil classification and diagnostic), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
- 22. Kuz'min V.A., Geokhimicheskie bar'ery v pochvakh Pribaikal'ya (Geochemical barriers in soils of Pribaikal'ye), *Pochvovedenie*, 2000, No. 10, pp. 1197–1202.

- 23. Lyanguzova I.V., *Tyazhelye metally v severotaezhnykh ekosistemakh Rossii* (Heavy metals in ecosystems of Russian northern taiga), Saarbrucken, 2016, 269 p.
- 24. Nechaeva E.G., Belozertseva I.A., Naprasnikova E.V., Vorob'eva I.B., Davydova N.L., Dubynina S.S., Vlasova N.V. *Monitoring i prognozirovanie veshchestvenno-dinamicheskogo sostoyaniya geosistem Sibirskikh regionov* (Monitoring and forecasting of the substance-dinamical state of geosystems in the Siberian regions), Novosibirsk: Nauka, 2010, 315 p.
- 25. Pereverzev. V.N., Genetic features of soils on sorted sand deposits of different origins in the Kola Peninsula, *Eurasian Soil Sci.*, 2009, Vol. 9, Iss. 42, pp. 976–983, DOI: <u>10.1134/S1064229309090038</u>.
- 26. Perel'man A.I., Kasimov N.S., *Geokhimiya landshafta* (Geochemistry of landscape), Moskow: Astreya-2000, 1999, 768 p.
- 27. Polynov B.B., Izbrannye trudy (Selectas), Moskow: Nauka, 1956, 751 p.
- 28. Fedorets N.G., *Raznoobrazie pochv i bioraznoobrazie v lesnykh ekosistemakh srednei taigi* (Diversity of soils and biodiversity in forest ecosystems of midlle taiga), Moskow: Nauka, 2006, 287 p.
- 29. Polyanskaya L.M., Nikonov V.V., Lukina N.V., Panikova A.N., *Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh* (Trace elements in boreal forests), Moskow: Nauka, 2004, 410 p.
- 30. Samofalova I.A., Rogova O.B., Luzyanina O.A., Savichev A.T., Geokhimicheskie osobennosti raspredeleniya makroelementov v pochvakh nenarushennykh landshaftov srednego Urala (na primere zapovednika "Basegi") (The geochemical specificities of distribution of macroelements within the soils of undisturbed landscapes of middle Ural (on the example of "Basegi" preserve), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 85, pp. 57–76, DOI: 10.19047/0136-1694-2016-85-57-76.
- 31. Semenov Yu.M., *Landshaftno-geokhimicheskii sintez i organizatsiya geosistem* (Landscape-geochemical synthesis and organization of geosystems), Novosibirsk: Nauka, 1991, 144 p.
- 32. Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V., Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundrovykh, taezhnykh i lesostepnykh katenakh Vostochno-Evropeiskoi ravniny (Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest steppe catenae of the East European Plain), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geografiya*, 2016, No. 3, pp. 29–39.
- 33. Serdobol'skii I.P., Metody opredeleniya pH i okislitel'novosstanovitel'nogo potentsiala pri agrokhimicheskikh issledovaniyakh (Methods of determination pH and redox potential in agrochemical investigations), In: *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Argochemical methods of soil analysis), Moskow: Nauka, 1965, pp. 195–244.

- 34. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* (Trends of chemical elements distribution in parent rocks and soils of Western Siberia), Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2007, 277 p.
- 35. Toikka M.A., Perevozchikova E.M., Levkina T.I., Zavarzin A.M, Mikhkiev A.I., Izergina M.M., *Mikroelementy v Karelii* (Trace elements in Karelia), Leningrad: Nauka, 1973, 284 p.
- 36. Urusevskaya I.S., Soil catenas on denudation plains in the forest-tundra and northern taiga zones of the Kola peninsula, *Eurasian soil science*, 2017, No. 7, Vol. 50, pp. 765–779, DOI: 10.7868/S0032180X17070127.
- 37. Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Solodovnikov A.N., Morozov A.K., *Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas* (Soils of Karelia. Geochemical atlas), Moskow: Nauka, 2008, 46 p.
- 38. Yashin I.M., Raskatov V.A., Shishov L.L., *Vodnaya migratsiya khimicheskikh elementov v pochvennom pokrove* (Water migration of chemical elements in soil cover), Moskow: MSKhA, 2003, 316 p.
- 39. Ander E.L., Johnson C.C., Cave M.R.A, Palumbo-Roe B., Nathanail C.P., R. Lark M., Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil, *Science of the Total Environment*, 2013, Vol. 454–455, pp. 604–618, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.005.
- 40. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G., Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation. A review, *Environmental Pollution*, 2019, Vol. 249, pp. 200–207, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.
- 41. Davydova N.D., Znamenskaya T.I., Lopatkin D.A., Landscape–Geochemical Approach to Solving Problems of Environmental Pollution, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, Iss. 3, pp. 345–352, DOI: 10.1134/S1995425514030020.
- 42. Evseev A.V., Krasovskaya T.M., Toxic metals in soils of the Russian North, *J. Geochem. Explor.*, 2017, Vol. 174, pp. 128–131, DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018.
- 43. Husson O., Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy, *Plant Soil*, 2013, Vol. 362, Iss. 1–2, pp. 389–417, DOI: 10.1007/s11104-012-1429-7.
- 44. Jarva J., Tarvainen T., Reinikainen J., Eklund M., TAPIR Finnish national geochemical baseline database, *Sci. Total Environ.*, 2010, Vol. 408, Iss. 20, pp. 4385–4395, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.050.
- 45. Kiikkilä O., Nieminen T. M. Starr M. Mäkilä M., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L., Leaching of dissolved organic carbon and trace

- elements after stem-only and whole-tree clear-cut on boreal peatland, *Water Air Soil Pollut.*, 2014, 225:1767, DOI: 10.1007/s11270-013-1767-y.
- 46. Lado L.R., Hengl T., Reuter H.I., Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database, *Geoderma*, 2008, Vol. 148, Iss. 2, pp. 189–199, DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.09.020.
- 47. Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C., Geochemical background can we calculate it? *Environ. Geol.*, 2000, Vol. 39, pp. 990–1000, DOI: 10.1007/s002549900084.
- 48. Reimann C., Caritat P., Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors, *Sci. Total Environ.*, 2005, Vol. 337, Iss. 1–3, pp. 91–107, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011.
- 49. Reimann C., Garrett R.G., Geochemical background concept and reality, Sci. Total Environ, 2005, Vol. 350, Iss. 1–3, pp. 12–27, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047.
- 50. Richardson J.B., Petrenko C.L., Friedland A.J., Base cations and micronutrients in forest soils along three clear-cut chronosequences in the northeastern United States, *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2017, Vol. 109, pp. 161–179, DOI: 10.1007/s10705-017-9876-4.
- 51. Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D., *Soil Pollution: a Hidden Reality*. FAO. Rome, 2018, 142 p., DOI: 10.3389/fenvs.2018.00130.