

УДК 504.064.36:550.4:631.445.12

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОРФЯНЫХ ПОЧВ БОЛОТНЫХ ЕЛЬНИКОВ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

Т. Т. Ефремова¹, О. А. Шапченкова¹, С. П. Ефремов¹, А. Ф. Аврова¹, М. В. Седельников²

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский федеральный университет 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, mike.sedelnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

Исследованы лесные торфяные почвы заболоченных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Выявлено сильное варьирование (C_v 42–88 %) содержания макро- и микроэлементов в слое современных почв (0–30 см). Средневзвешенное количество (с учетом мощности горизонтов почв и площадей торфяных массивов) в пределах орографического профиля 1087–573 м н. у. м. составляет (мг/кг): $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$. Методами многомерного статистического анализа выполнено структурирование торфяных почв по содержанию зольных элементов в три кластера, соответствующие высотным отметкам 1087, 832–622, 573 м н. у. м. Наибольшими дискриминирующими возможностями обладают Zn и Fe (82.6 %). Меньшую долю различия обеспечивают Cu, Ni (17.4 %). Топографические ряды долинных торфяных почв определяются гидрогеохимической зональностью подземных вод, а также выносом элементов латеральными миграционными потоками. Впервые статистически обоснованы границы высотных поясов торфяных почв по содержанию минеральных элементов и охарактеризован геохимический состав выделенных экотопических рядов (кластеров) почв. В почвах автономного ландшафта (высокогорья) аккумулируется только Pb и Cd. По сравнению с ним в кластере почв среднегорья количество большинства зольных элементов увеличивается в среднем в 2 раза. В низкогорье интенсивность аккумуляции несколько ослабевает. В почвенном профиле радиальная геохимическая миграция Fe как характерного элемента болот с большей силой положительно связана с зольностью торфяного субстрата, Sr – с реакцией среды, Cu и Mn – с фульвокислотами. В текущий период не выявлено техногенной деградации торфяных почв восточных отрогов Кузнецкого Алатау. Эколого-геохимические особенности горных торфяных почв согласуются с характеристикой естественных биогеохимических провинций юга Центральной Сибири, в пределах которых они развиваются.

Ключевые слова: горные торфяные почвы, геохимия элементов, загрязнение, формализованное структурирование, многомерный статистический анализ.

DOI: 10.15372/SJFS20220402

ВВЕДЕНИЕ

Мощное антропогенное вмешательство в эволюционное развитие биосферы и прогрессирующее ухудшение природной среды привело к осознанию того, что регенерационные механизмы геосистем, слагающих биосферу, уже не справляются с прессингом разнообразных промышленных производств (Теплицын, Ваймер, 2005). Особого внимания требуют почвы

городских территорий, слаборазвитые и гидроморфные (Водяницкий, 2008). В этой связи тщательного исследования заслуживает геохимическая летопись слабо изученных болот Алтае-Саянской горной страны. Разграничение тяжелых металлов на различные весовые доли в зависимости от зоны локализации и гипсометрических уровней дает ценную информацию для понимания ландшафтных, климатических изменений, антропогенного воздействия на от-

даленные горные районы и помогает реконструировать историю загрязнения компонентов природной среды техногенными выбросами (Сысо, 1996; Shotyk, 1996; Инишева, Цыбукова, 1999; Bindler, 2006; Jia et al., 2006; Ефремова, Ефремов, 2014; Efremova, Efremov, 2014; Кашулина, 2017; Kashulina, 2017; Bao et al., 2018, 2019; Pratte et al., 2018; Захарихина, Литвиненко, 2019; и др.). Горные торфяники юга Сибири «гасят» аэротехногенные выбросы предприятий (цветная металлургия, горнодобывающие отрасли угля, рудного золота и т. д.) и выполняют важную биогеохимическую функцию сохранения качества вод сибирских рек, истоки которых лежат в болотах этой горной территории.

Публикации по геохимии горных болотных экосистем немногочисленны. Торфяные почвы горной тайги Западного Саяна по сравнению с торфами южной лесостепи Минусинской котловины обеднены Ca, Ba, Sr, Fe, Cr, U, V и обогащены Yb, Cs, Lu, а концентрация золота в торфяных залежах Восточно-Саянского золотоносного района в отдельных слоях превышает кларк литосферы в 50 раз (Шарафутдинов, 2006). В высокогорных болотах западного макросклона Кузнецкого Алатау выявлено техногенное накопление в верхних слоях торфяной залежи 3–5 (8) см наиболее опасных загрязнителей природной среды: Hg – до 40 мг/кг, Pb – 35.5, Zn – 33.6 мг/кг в результате поступления с влагоносными воздушными массами промышленного Кузбасса (Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010). Такие результаты соответствуют представлению, что высокогорные торфяники в большей мере подвержены накоплению поллютантов, привносимых с дальних расстояний, тогда как торфяники низких высот отражают преимущественно местные геохимические особенности (Bao et al., 2019). В этом аспекте сведений о макро- и микроэлементной неоднородности горных торфяных массивов с позиции геохимической сопряженности повышенных и пониженных элементов горного рельефа практически не содержится. Важнейшей характеристикой физико-географического облика гор является, как известно, структура вертикальных почвенных поясов, в которых торфяные почвы, как правило, не представлены. Объективная организация почв заболоченных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау в связи с градиентами высот выполнена к настоящему времени по кислотно-основным показателям и гумусному состоянию (Ефремова и др., 2019; Efremova et al., 2019).

Цель настоящей работы – выполнить формализованное разграничение (кластеризацию) торфяных почв по содержанию зольных элементов в пределах орографического профиля, охарактеризовать особенности геохимического состава выделенных кластеров и оценить экологическое состояние почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены горные торфяные почвы заболоченных речных долин (бассейны рек Белый и Черный Июс) на различных гипсометрических уровнях восточного макросклона Кузнецкого Алатау – части Алтае-Саянской горной страны. Орографический профиль восточных отрогов Кузнецкого Алатау характеризуется преимущественно низкорным и среднегорным рельефом высотой 400–800 м и отдельными хребтами, не превышающими 1500 м (Воскресенский, 1962).

Болотные экосистемы различных высотных поясов питаются, как известно, преимущественно подземными водами, разгрузка которых происходит обычно по горным склонам и речным долинам, которые, как правило, заболочены и покрыты в основном ельниками с незначительным участием лиственницы и кедра преимущественно гипново-зеленомошной группы типов леса. Класс бонитета V–Va. Степень проективного покрытия торфяного массива мхами – 100 %. Преобладают смешанные сообщества гилокомиума блестящего (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), аулакомниума вздутого (*Aulacomnium turgidum* (Walenb.) Schwägr.) и болотного (*A. palustre* (Hedw.) Schwägr.), а также монодоминантные сообщества томентгипнума блестящего (*Tomenthypnum nitens* (Hedw.) Loeske).

Исследуемые торфяные массивы поименованы по названию рек, в долинах которых они формируются (рис. 1).

В высокогорной заболоченной долине р. Пихтерек (1087 м н. у. м.) залегает торфяной массив площадью 0.83 тыс. га. Географические координаты отбора почвенных образцов: 54°05'17" с. ш., 89°05'49" в. д. Торфяной массив Бюря (0.65 тыс. га) сформирован на высоте 832 м н. у. м.: 54°07'41" с. ш., 90°15'31" в. д., Тунгужуль (1.77 тыс. га) – на абсолютной отметке 622 м: 54°16'32" с. ш., 89°39'02" в. д., Печище (0.62 тыс. га) – на уровне 573 м: 54°57'54" с. ш., 89°18'08" в. д.

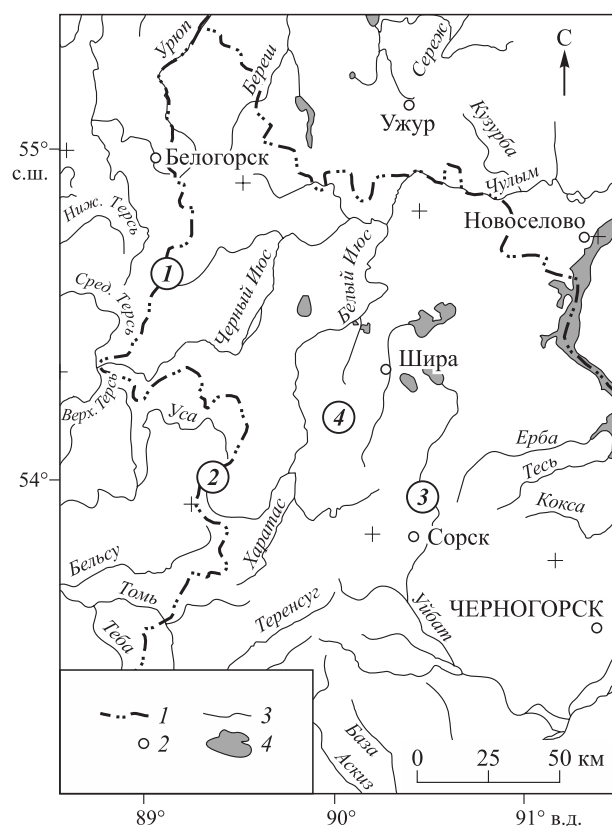


Рис. 1. Карта-схема расположения горных торфяных массивов.

Абсолютные высоты, м: 1 – Пихтерек, 1087; 2 – Бюра, 832; 3 – Тунгузюль, 622; 4 – Печище, 573.

В пределах восточного макросклона Кузнецкого Алатау по кислотно-основным свойствам выделены следующие геохимические ассоциации торфяных почв (Ефремова и др., 2018): кислые по всему профилю олиготрофные и олиго-мезотрофные на абсолютных высотах 1500–1100 м (массив Пихтерек), слабокислые мезоэутрофные на высотах 1100–800 м (массив Бюра), нейтральные эутрофные на абсолютных высотах 800–500 м (массивы Тунгузюль и Печище). Для отбора образцов почв вырезались торфяные монолиты размером 25 × 25 × 30 (40) см, которые подразделялись на горизонты. На каждом объекте отобрано по 3–4 монолита сообразно доминирующим растительным ассоциациям. Валовое содержание макро- и микроэлементов в торфяном субстрате определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре МГА-915 МД (Россия) (Методика..., 2009), физико-химические показатели – по общепринятым в почвоведении методам (Аринушкина, 1970). Классификация почв выполнена по принципу насыщенности основаниями (Пьявченко, Корнилова, 1978). Многомерный статистический анализ проведен в программах Excel и Statistica 6 (Халафян, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В границах абсолютных высот 1087–573 м восточного макросклона Кузнецкого Алатау в современных (корнеобитаемых) торфяных почвах (0–30 см) содержание макро- и микроэлементов сильно варьирует (C_v 42–88 %). Средневзвешенное количество (с учетом мощности горизонтов почв и площадей торфяных массивов) составляет: $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$, мг/кг. Большинство макро- и микроэлементов тесно положительно взаимосвязаны между собой и зольностью торфа (табл. 1), Ni, Fe, Co, Al, Cr – дополнительно со степенью гумификации (сумма гуминовых и фульвокислот), Sr, Co, Al – с pH, исключение – Zn, Cd и Pb, которые не связаны как с переменными, так и друг с другом. Коррелированность многих перечисленных металлов и сходное ранжирование по содержанию выявлена также в торфяных болотах горы Чанбай (высота более 900 м н. у. м.) на территории Китая (Jia et al., 2006).

Высокая вариабельность и коррелированность химических элементов торфяных почв разных высотных поясов горного профиля обусловила целесообразность их группировки методом кластерного анализа. На дендрограмме объекты Пихтерек и Печище можно классифицировать как самостоятельные кластеры (рис. 2, а).

Объединились массивы Бюра и Тунгузюль, почвы которых наиболее близки по свойствам. Достоверность межгрупповых различий оценили с помощью дискриминантного анализа. Судя по расстоянию Махаланобиса и p -уровню значимости, сгруппированные классы почв достоверно отличаются друг от друга (табл. 2).

Итоговый результат корректно классифицированных наблюдений составляет 95 %.

Методом многомерного шкалирования (как средством визуализации) адекватно воспроизвели наблюдаемые расстояния Махаланобиса в пространстве меньшей размерности (на плоскости). Ясность полученной конфигурации точек на диаграмме указывает на высокое качество согласия с воспроизводимой группировкой торфяных почв на абсолютных высотных отметках: 1087 м – высокогорье, 832–622 – среднегорье, 573 м – низкогорье (рис. 2, б). Градация гипсометрических уровней условная и практически совпадает с высотно-поясным спектром растительного покрова: выше 1100 м – высокогорье, 800–1100 – среднегорье, 550–600 м – низкогорье (Бочарников, Исмаилова, 2011).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Спирмена макро- и микроэлементов и химических показателей горных торфяных почв

Элемент	Sr	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	Fe	Mn	Co	Al	Cr	З	СГ	pH
Sr		-0.05	0.30	0.51	-0.45	0.05	0.54	0.56	0.63	0.64	0.26	0.73	0.15	0.90
Zn	-0.05		0.42	0.05	0.13	0.23	-0.06	0.32	0.09	0.14	-0.05	-0.07	-0.50	-0.10
Cu	0.30	0.42		0.75	-0.01	-0.11	0.67	0.91	0.76	0.71	0.61	0.62	0.38	0.29
Ni	0.51	0.05	0.75		-0.13	0.23	0.98	0.82	0.94	0.89	0.91	0.92	0.70	0.44
Pb	-0.45	0.13	-0.01	-0.13		0.44	-0.16	-0.17	-0.27	-0.26	0.05	-0.23	0.23	-0.53
Cd	0.05	0.23	-0.11	0.23	0.44		0.24	-0.05	0.12	0.16	0.34	0.26	0.18	-0.07
Fe	0.54	-0.06	0.67	0.98	-0.16	0.24		0.75	0.95	0.89	0.89	0.94	0.75	0.50
Mn	0.56	0.32	0.91	0.82	-0.17	-0.05	0.75		0.85	0.79	0.63	0.73	0.40	0.46
Co	0.63	0.09	0.76	0.94	-0.27	0.12	0.95	0.85		0.94	0.79	0.92	0.59	0.57
Al	0.64	0.14	0.71	0.89	-0.26	0.16	0.89	0.79	0.94		0.73	0.89	0.54	0.61
Cr	0.26	-0.05	0.61	0.91	0.05	0.34	0.89	0.63	0.79	0.73		0.78	0.78	0.17
З	0.73	-0.07	0.62	0.92	-0.23	0.26	0.94	0.73	0.92	0.89	0.78		0.64	0.71
СГ	0.15	-0.50	0.38	0.70	0.23	0.18	0.75	0.40	0.59	0.54	0.78	0.64		0.12
pH	0.90	-0.10	0.29	0.44	-0.53	-0.07	0.50	0.46	0.57	0.61	0.17	0.71	0.12	

Примечание. Полужирный шрифт – коэффициенты, значимые на уровне $p < 0.05$; З – зольность; СГ – степень гумификации ($\Sigma ГК + \Sigma ФК$).

Для нахождения взаимосвязи между выделенными кластерами и содержанием металлов использовали канонический корреляционный анализ. Взвешенные суммы переменных из каждого множества определяют канонический

корень – некую «скрытую» переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных. Выделено два значимых канонических корня, судя по p -уровню < 0.001 (табл. 3).

Наиболее тесная связь между множествами переменных обнаруживается с первым каноническим корнем. О лучшем разграничении кластеров торфяных почв по корню 1 свидетельствует также статистика λ Уилкса, которая, будучи обратной мерой, приближается к нулю.

Кумулятивная доля объясненной дисперсии первого корня составляет 82.6 %, второй обеспечивает меньшую долю различия – 17.4 % (табл. 4).

Стандартизованные коэффициенты определяют наибольшую долю или «вес» каждой переменной в значение дискриминантной функции (корня). Согласно критерию Кайзера, к рассмотрению принимались те стандартизованные коэффициенты, абсолютные значения которых больше 1 (Ким и др., 1989). В дискриминантную функцию (корня) 1 наибольший совокупный вклад вносят показатели Zn и Fe, в дискриминантную функцию 2 – Cu и Ni. Согласно структурным коэффициентам, первая функция в большей мере связана с Zn, вторая – с Cu. Преимущественный вклад этих металлов в систематизацию торфяных почв согласуется с избыточной обеспеченностью Zn и Cu Тигиртишской биогеохимической провинции рудных полей Центральной Сибири, в пределах которой расположены исследуемые объекты, и соответству-

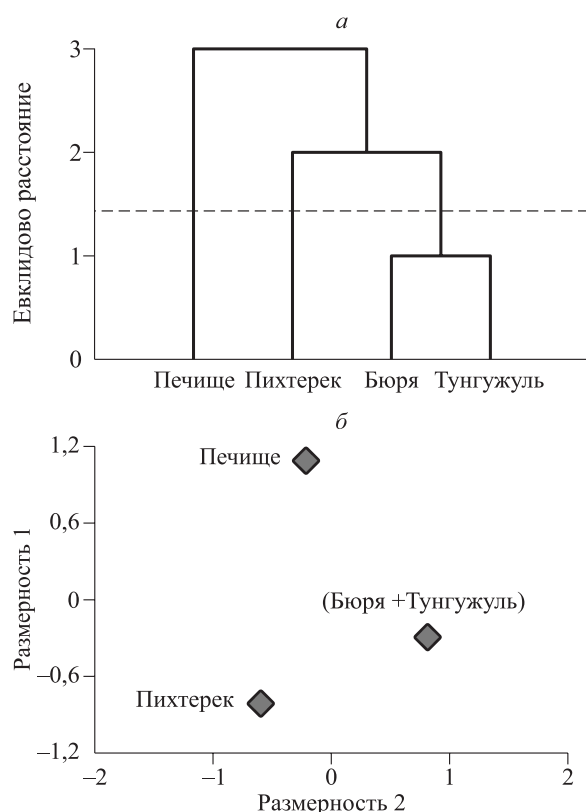


Рис. 2. Кластеризация почв горных торфяных массивов по содержанию Al и тяжелых металлов (а), размещение на плоскости в многомерном пространстве признаков (б).

Таблица 2. Оценка методом дискриминантного анализа межгрупповой дисперсии кластеров торфяных почв

Торфяные массивы	Квадраты расстояний Махаланобиса			Матрица классификации, количество корректно классифицированных наблюдений			
	p -уровни значимости			%	число		
	1	2 + 3	4		1	2 + 3	4
Пихтерек – 1		13	61	89	16	2	0
Бюра + Тунгужуль – 2 + 3	< 0.001		35	96	1	29	0
Печище – 4	< 0.001	< 0.001		100	0	0	20
				95	Итоги классификации		
					17	31	20

Примечание. Над чертой – квадраты расстояний Махаланобиса, под чертой – p -уровни значимости различий.

Таблица 3. Собственные значения канонических дискриминантных функций (корней) и их статистическая значимость

Дискриминантная функция (корень)	Собственное значение	Каноническая корреляция, R	λ -Уилкса	χ^2 -критерий	p -уровень значимости
0	7.729	0.940	0.043	106.44	< 0.001
1	1.622	0.786	0.381	32.78	< 0.001

ет наиболее высоким значениям азрогенного выпадения этих элементов на территории центральных, южных районов Красноярского края, а также Республики Хакасии, $n \cdot 10^{-4}$ г/(м² в год): Cu – 20.8, Zn – 27.1 против Mo – 1.7, Pb – 5.5, Co – 1.8, Ni – 4.7 (Мирошников и др., 2003).

Таблица 4. Стандартизованные коэффициенты вклада химических элементов в дискриминантную функцию (корень) и структурные коэффициенты их корреляции с соответствующими корнями

Химический элемент	Коэффициенты			
	стандартизованные		структурные	
	Корень			
	1	2	1	2
Sr	0.76	−0.90	0.15	−0.17
Zn	1.55	0.31	0.41	0.21
Cu	−0.08	−1.62	0.21	−0.28
Ni	0.70	1.29	0.15	0.22
Pb	−0.56	−0.64	−0.14	0.00
Cd	−0.55	0.50	−0.10	0.20
Fe	−1.11	−0.79	0.12	0.09
Mn	0.62	0.38	0.19	−0.19
Co	0.41	0.90	0.16	0.09
Al	−0.04	−0.12	0.18	0.21
Cr	−0.10	0.30	0.06	0.09
Накопленная доля	0,826	1.0		
Объясненная дисперсия, %	82.6	17.4		

Итак, получена новая статистически обоснованная информация пространственной дифференциации торфяных почв по составу минеральных элементов в пределах орографического профиля восточных отрогов Кузнецкого Алатау и определены высотные границы разграничения почв. Хронологическая организация торфяных почв согласуется в определенной мере с гидрогеохимической зональностью подземных вод горных территорий юга Сибири (Степанов, 1959; Ефремова и др., 2015). Так, торфяные почвы кластера Пихтерек (абсолютная отметка 1087 м н. у. м.) приурочены к зоне ультрапресных кислых гидрокарбонатных вод, состав катионов которых отличается большой пестротой. Торфяные массивы Бюра, Тунгужуль, Печище (800–573 м н. у. м.) формируются в зоне жестких слабокислых и слабощелочных гидрокарбонатно-кальциево-магниево-вод. Торфяные массивы различных ступеней рельефа Кузнецкого Алатау целесообразно характеризовать как парагенетические ассоциации, связанные между собой миграцией элементов от верхних гипсометрических ступеней рельефа к нижним (Глазовская, 1964). На высотном уровне 832–622 м н. у. м. содержание большинства минеральных элементов увеличивается примерно в 2 раза (табл. 5). В нижележащие почвы интенсивность миграции несколько ослабевает. В торфяных почвах гипсометрического уровня 573 м н. у. м. содержится почти в 4 раза больше Zn, Co, Al, в 2–3 раза – Sr, Cu, Ni,

Таблица 5. Содержание макро- и микроэлементов в кластерах современных торфяных почв орографического профиля восточных отрогов Кузнецкого Алатау, мг/кг

Глубина, см	Sr	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	Fe	Mn	Co	Al	Cr
Кластер высококорных олиго-мезотрофных почв, 1087 м н. у. м.											
<i>Торфяной массив Пихтерек</i>											
0–6	170	30.9	8.6	6.6	9.1	0.30	4990	117.4	1.8	2844	13.7
6–15	121	19.6	6.5	8.4	12.5	0.43	6253	31.8	1.3	3734	18.7
15–30	105	4.1	3.6	4.2	2.1	0.09	2911	8.4	0.9	2168	6.0
Средневзвешенное	129	17.8	6.2	6.6	8.2	0.29	4845	47.7	1.3	2993	13.3
Кластер среднегорных торфяных почв, 832–622 м н. у. м.											
<i>Мезо-эуτροφные, торфяной массив Бюря</i>											
0–5	78	62.5	13.9	4.8	8.3	0.12	1862	194	0.7	1192	7.1
5–10	125	68.8	18.9	7.9	11.0	0.25	5722	341	2.4	5122	11.3
10–15	174	40.5	23.5	12.4	7.4	0.22	11206	617	5.0	8349	17.5
15–20	237	30.8	29.5	16.1	3.8	0.08	18354	1200	6.9	9656	31.8
Средневзвешенное	162	47.7	22.2	11.0	7.3	0.17	10167	635	4.2	6607	18.1
<i>Эуτροφные, торфяной массив Тунгужуль</i>											
0–5	187	45.2	6.7	3.0	2.4	0.14	2780	113	0.7	1400	5.3
5–15	285	37.2	9.0	5.5	4.4	0.22	3610	236	1.5	5112	6.7
15–20	340	27.8	11.9	8.8	4.0	0.15	7420	280	3.1	9419	9.5
20–30	359	25.0	18.4	14.2	2.6	0.14	14518	575	5.9	12420	22.7
Средневзвешенное	302	34.3	12.2	8.5	2.5	0.17	7743	336	3.1	7647	12.3
Средневзвешенное*	232	41.0	17.2	9.8	4.9	0.17	8955	485	3.6	7127	15.2
Кластер низкорных эуτροφных почв, 573 м н. у. м.											
<i>Торфяной массив Печице</i>											
0–5	198	56.4	10.3	7.7	2.7	0.12	3896	312	1.9	4049	8.1
5–10	241	67.9	13.6	9.8	3.2	0.22	7378	483	3.0	6742	13.1
10–30	235	66.6	19.8	26.1	2.1	0.08	23506	403	9.5	20144	38.0
Средневзвешенное	227	64.4	15.9	17.4	2.5	0.24	14571	400	6.0	12770	24.3
Статистическая оценка содержания металлов в торфяных почвах по градиенту высот											
Средневзвешенное	230	37.8	13.2	9.9	4.6	0.21	8623	335	3.4	7295	15.4
Ошибка среднего	38	9.9	3.4	2.4	1.5	0.03	2058	121	1.0	2019	2.8
Медиана	195	41.0	14.1	9.8	4.9	0.20	8955	368	3.6	7127	15.7
Минимум	129	17.8	6.2	6.6	2.5	0.17	4845	48	1.3	2993	12.3
Максимум	302	64.4	22.2	17.4	8.2	0.29	14571	635	6.0	12770	24.3

* Среднее для кластера среднегорных почв в целом.

Fe, Cr по сравнению с 1087 м н. у. м. В почвах высокогорного кластера содержится в 2–3 раза больше Cd и Pb. На всех высотных уровнях они аккумулируются в слое 0–6 (15) см. В горах Юра (Швейцария), Чанбай и Фэнхуан (северо-восток Китая) Cd, Pb, Cu, Zn также концентрируются в верхних горизонтах торфяных залежей относительно глубоких частей профиля (Shotyk, 1996; Jia et al., 2006; Bao et al., 2018).

Накопление Pb, Sn, Cd, Zn и Sb в поверхностных слоях торфяных залежей связывают в основном с лесными пожарами и атмосферным переносом загрязнителей с дальних расстояний

(Gerdol, Bragazza, 2006; Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010; Богуш и др., 2019; Bogush et al., 2019; Bao et al., 2019).

В торфяных почвах Кузнецкого Алатау, это, вероятнее всего, результат техногенной воздушной миграции со стороны Кузбасского каменно-угольного бассейна, Сорского молибденового комбината и благоприятных кислотно-основных условий почвенной среды (в нейтральной и щелочной среде эти элементы малоподвижны).

В профиле торфяных почв различных гипсометрических уровней миграция макро- и микроэлементов определяется единими факторами.

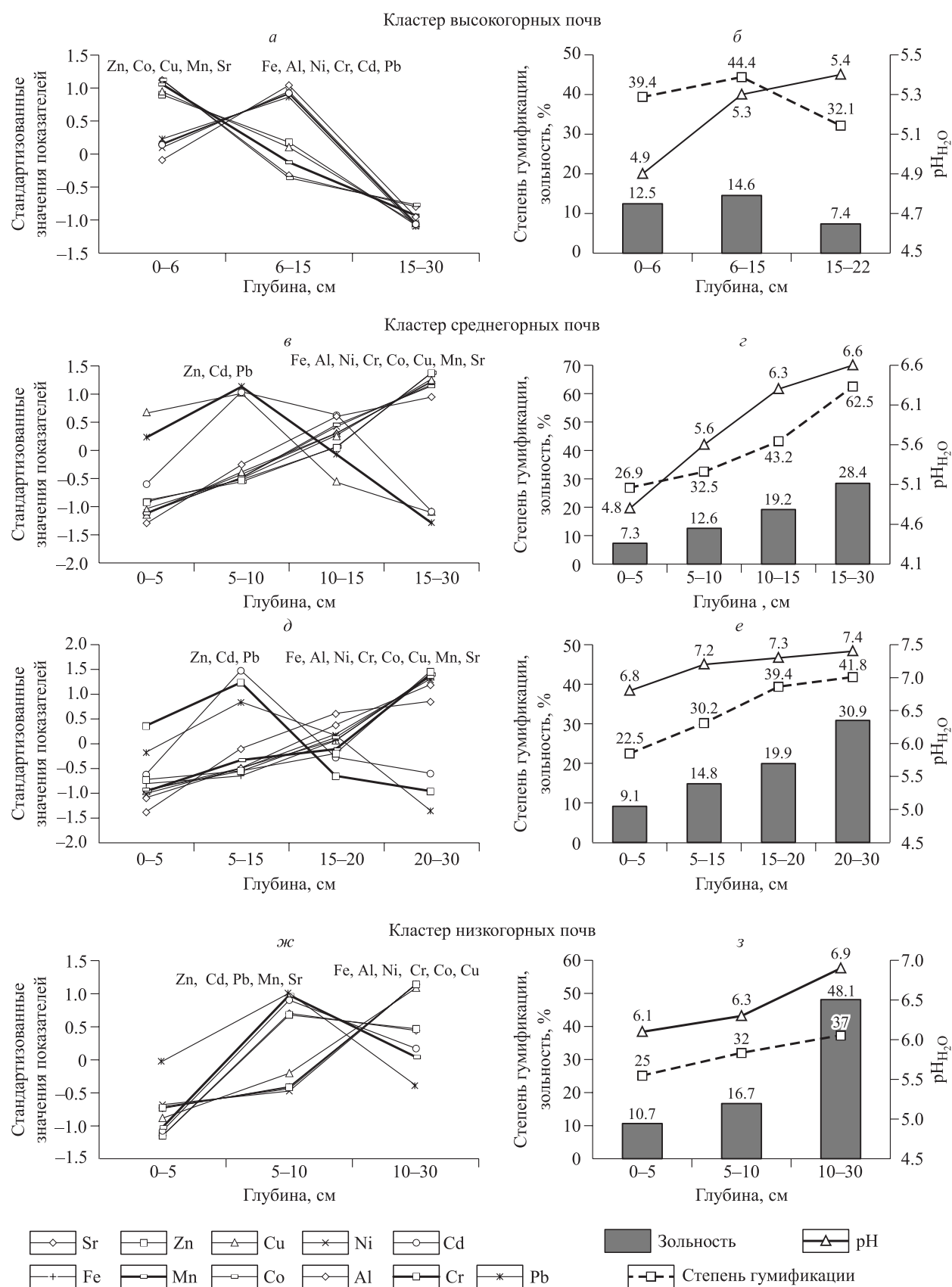


Рис. 3. Распределение металлов и химических показателей в почвенном профиле высокогорных олиго-мезотрофных (а и б соответственно), среднегорных мезо-эутрофных (в, д и г, е), низкогорных эутрофных (ж и з) почв.

Так, распределение парагенетической ассоциации Fe, Al, Ni, Cr, Co по профилю визуально соответствует тренду зольности, pH и степени гумификации торфяного субстрата (рис. 3). Известно, что минеральные компоненты активно вступают в многообразные взаимодействия с гумусовыми кислотами, образуя различные по составу сложные органоминеральные производные, которые выпадают в осадок на месте образования.

В этой связи в почвах средне- и низкогогорья содержание Fe, Al, Ni, Cr, Co вниз по профилю последовательно возрастает благодаря повышению степени гумификации, зольности и pH до нейтральной и даже слабощелочной, в условиях которой эти элементы малоподвижны. Зольность нижних горизонтов относительно верхних в 3–4 раза превышает конституционную (12 %) и свидетельствует о преимущественном вкладе абигенного фактора в накопление элементов. В олиготрофном кластере почв высокогорья на фоне кислой по всему профилю реакции среды количество макро- и микроэлементов резко снижается с глубиной подобно зольности, близкой к конституционной, и степени гумификации торфа вследствие влияния мерзлоты.

Совокупное воздействие физико-химических и биохимических показателей торфяных

почв на радиальную геохимическую дифференциацию металлов исследовали методом множественного регрессионного анализа.

Изучали связь Fe как характерного элемента болот и представителя устойчивой парагенетической ассоциации, а также Sr, Mn, Cu, миграция которых в почвах различных гипсометрических уровней несколько различается.

В качестве независимых признаков в модель включили показатели зольности, величину pH_{H_2O} , сумму гуминовых кислот ($\Sigma Г К$) и сумму фульвокислот ($\Sigma Ф К$). Построенные модели, судя по коэффициенту множественной детерминации ($R^2 = 0.65–0.97$) и p -уровню значимости F -критерия ($0.007 – < 0.001$), описывают высокую взаимосвязь показателей (табл. 6).

Силу влияния на функцию отдельных прогностических признаков оценивали по стандартизованным регрессионным коэффициентам beta в порядке убывания их значений. На радиальную геохимическую миграцию Fe наибольшее влияние оказывает зольность торфяного субстрата, Sr – реакция среды, Cu и Mn – фульвокислоты.

Острота экологических проблем в связи с масштабным хозяйственным освоением территорий юга Средней Сибири нарастает. Специфика производств (угольная и золотодобывающая

Таблица 6. Результаты множественного регрессионного анализа связи металлов и химических показателей горных торфяных почв

Предикторы	Beta	Стандартная ошибка beta	Регрессионный коэффициент b	Стандартная ошибка b	t -критерий Стьюдента	p -уровень
Железо						
Оценка модели: $R^2 = 0.97$, $F = 241.1$, $p < 0.001$						
Константа			–6846.8	1139.0	–6.0	< 0.001
Зольность	0.89	0.05	516.1	27.2	19.0	< 0.001
$\Sigma Ф К$	0.24	0.05	301.2	60.2	5.0	< 0.001
Марганец						
Оценка модели: $R^2 = 0.70$, $F = 15.9$, $p = 0.001$						
Константа			–1613.3	398.8	–4.0	0.002
$\Sigma Ф К$	0.77	0.15	46.5	9.4	5.0	< 0.001
pH	0.50	0.15	173.9	53.7	3.2	0.008
Медь						
Оценка модели: $R^2 = 0.65$, $F = 7.1$, $p < 0.007$						
$\Sigma Ф К$	0.87	0.25	1.3	0.4	3.5	0.007
Стронций						
Оценка модели: $R^2 = 0.86$, $F = 28.3$, $p < 0.001$						
Константа			–208.3	81.2	–2.6	0.028
pH	0.69	0.12	66.7	11.4	5.8	< 0.001
$\Sigma Г К$	0.51	0.16	6.9	2.1	3.2	0.009
$\Sigma Ф К$	–0.38	0.15	–6.4	2.6	–2.5	0.032

Примечание. В таблицу внесены только значимые параметры уравнения.

отрасль, цветная металлургия, интенсификация сельского хозяйства и др.), разработка которых отличается повышенным объемом антропогенных нагрузок на природную среду, вызывает необходимость мониторинга загрязнения окружающей среды.

Для оценки комплексного полиэлементного загрязнения горных торфяных почв использовали суммарный показатель загрязнения Z_c (Сае́т и др., 1990; Перельман, Касимов, 1999):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (1)$$

где Z_c – суммарный показатель загрязнения; K_c – коэффициент техногенной концентрации больше 1; n – число элементов с K_c больше 1.

Техногенные концентрации определяют, как известно, относительно геохимического фона, который пока не разработан ни по регионам, ни по типам торфяных почв, что утверждают и другие авторы (Московченко, 2006; Безносиков и др., 2007; Beznosikov et al., 2007). В таком случае наиболее объективное представление о местном геохимическом фоне дает особенно часто встречающееся в выборке значение среднего содержания элемента (Добровольский, 1999). Такой подход позволил охарактеризовать природный фон тяжелых металлов и алюминия в торфяных почвах восточного макросклона Кузнецкого Алатау: Sr – 118, Zn – 38.3, Cu – 10.2, Ni – 7.6, Pb – 1.8, Cd – 0.15, Fe – 3700, Mn – 137, Co – 1.7, Cr – 8.1, Al – 3405 мг/кг. Большинство этих металлов входит в список нормируемых химических элементов, принятых в России, Канаде, США и Нидерландах для мониторинга качества почв и защиты окружающей среды (Семенов, Королева, 2019; Semenov, Koroleva, 2019).

Оценили также участие химического элемента в геохимической ассоциации M_c , % (Сорокина и др., 1984):

$$M_c = (K_c - 1) / Z_c \times 100 \%, \quad (2)$$

где K_c – коэффициент концентрации (аномальности) химического элемента; Z_c – суммарный показатель загрязнения.

Суммарный полиэлементный показатель загрязнения кластеров торфяных почв всех гипсометрических уровней характеризует допустимый уровень загрязнения тяжелыми металлами (табл. 7).

Однако в структуре геохимической ассоциации высокогорных почв преобладает доля высокотоксичных элементов и явно доминирует Pb (55 %). Тенденция показательна: повышенная концентрация Pb отмечается в высокогорных торфяниках западного макросклона Кузнецкого Алатау (Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010) и горах Китая (Pratte et al., 2018). Есть мнение, что опасность Pb, Cd, Zn в почвах, согласно ГОСТ 17.4.1.02-83, (ГОСТ 17.4.1.02-83, 2008), преувеличена по сравнению с общетоксикологическим подходом нидерландских экологов (Водяницкий и др., 2012; Vodyanitskii et al., 2012). Между тем свинец стабилен в органических почвах: средний срок его сохранения исчисляется от сотен до тысяч лет (Heinrichs, Mayer, 1977). В геохимической ассоциации торфяных почв среднегорья доля высокоопасных элементов-токсикантов снижается более чем в 4 раза. В условиях низкогогорья показатель загрязнения торфяных почв восточного макросклона достигает наибольших значений ($Z_c = 18$). При этом существенно (почти в 8 раз) уменьшается вклад высокоопасных элементов.

Таким образом, на восточном склоне Кузнецкого Алатау не выявлено техногенной деградации торфяных почв. Такое заключение не противоречит оценке уровня загрязнения Тигиртишской биогеохимической провинции (Z_c 14.2) Центральной Сибири, в пределах территории

Таблица 7. Оценка загрязнения тяжелыми металлами кластеров горных торфяных почв

Ассоциации торфяных почв, геохимическая формула, %	Z_c	Элементы-токсиканты, %		
		$\sum$	высоко опасные	умеренно опасные
Кластер высокогорных олиго-мезотрофных почв $Pb_{55}^I Cd_{14}^I Cr_{10}^{II} Sr_2^{III} Fe_5$	7	81	69	10
Кластер среднегорных мезо-эуτροφных и эуτροφных почв $Pb_{14}^I Cd_1^I Zn_1^I Cu_6^{II} Ni_2^{II} Co_9^{II} Cr_7^{II} Mn_{21}^{III} Sr_8^{III} Fe_{12} Al_9$	12	69	16	24
Кластер низкогогорных эуτροφных почв $Pb_2^I Cd_3^I Zn_4^I Cu_3^{II} Ni_7^{II} Co_{14}^{II} Cr_{11}^{II} Mn_{11}^{III} Sr_5^{III} Fe_{17} Al_{16}$	17	60	9	35

Примечание. Z_c – суммарный показатель загрязнения, верхний индекс химического элемента – класс опасности согласно ГОСТ 17.4.1.02-83 (2008).

которой залегают обсуждаемые торфяные массивы (Мирошников и др., 2003). Однако есть основание говорить о существовании реальной опасности загрязнения торфяных почв в недалеком будущем. Величина Z_c в низкогорном поясе приближается к нижней границе среднего умеренноопасного уровня загрязнения тяжелыми металлами (Z_c 16–32). Высокая доля Pb в суммарном показателе загрязнения высокогорных районов также свидетельствует о повышенном экологическом риске.

ВЫВОДЫ

Средневзвешенное содержание макро- и микроэлементов в торфяных почвах восточных отрогов Кузнецкого Алатау составляет, мг/кг: $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$ и по градиенту абсолютных высот (1087–573 м н. у. м.) сильно варьирует (Cv 42–88 %). Впервые методами многомерного статистического анализа выполнено формализованное разбиение торфяных почв в три кластера по гипсометрическим уровням: высокогорье – 1087 м, среднегорье 832–622 и низкогорье 573 м н. у. м. Основной совокупный вклад в разграничение почв по орографическому профилю вносят Zn и Fe (82.6 %), Cu, Ni обеспечивают (17.4 %). Итоговое число классификационных попаданий составляет 95 %.

Формирование кластеров торфяных почв на различных гипсометрических уровнях горного рельефа согласуется с гидрогеохимической зональностью подземных вод горных территорий юга Сибири и подчиняется законам развития биогенного геохимического ландшафта. Содержание большинства зольных элементов в почвах геохимически подчиненного кластера (высотный уровень 573 м н. у. м.) в 3–4 раза больше относительно 1087 м н. у. м. В высокогорье локализуются лишь Pb и Cd. Радиальная геохимическая миграция элементов в почвенном профиле с наибольшей силой связана у железа с зольностью торфяного субстрата, стронция – с реакцией среды, Cu и Mn – с фульвокислотами. Суммарный показатель загрязнения ассоциации элементов относительно фона не выявил техногенной деградации горных торфяных почв в текущий период.

Эколого-геохимические особенности горных торфяных почв заболоченных речных долин согласуются с характеристикой естественных биогеохимических провинций юга Центральной Сибири, в пределах которых они развиваются.

Работа выполнена в рамках базового проекта Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири» № 0356-2021-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Кондратенко Б. М. Оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах Европейского Северо-Востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064–1070.
- Богущ А. А., Бобров В. А., Климин М. А., Бычинский В. А., Леонова Г. А., Кривоногов С. К., Кондратьева Л. М., Прейс Ю. И. Особенности формирования отложений и концентрирования элементов в профиле торфяника Выдринский (Южное Прибайкалье) // Геол. и геофиз. 2019. Т. 60. № 2. С. 194–208.
- Бочарников М. В., Исмаилова Д. М. Высотная поясность растительного покрова восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 6. С. 76–84.
- Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 83 с.
- Водяницкий Ю. Н., Савичев А. Т., Трофимов С. Я., Шишкова Е. А. Накопление тяжелых металлов в загрязненных нефтью торфяных почвах // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1109–1114.
- Волкова И. И., Байков К. С., Сысо А. И. Болота Кузнецкого Алатау как естественные фильтры природных вод // Сиб. экол. журн. 2010. № 3. С. 379–388.
- Воскресенский С. С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. 352 с.
- Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
- ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы (ССОП). Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 4 с.
- Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // Почвоведение. 1999. № 5. С. 639–645.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 965–974.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 58–73.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В., Аврова А. Ф. Высотная дифференциация кислотно-основных свойств долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау // Вестн. Том. гос. ун-та. Биол. 2018. № 41. С. 135–155.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В., Аврова А. Ф. Формализованный анализ гумусного состояния горных торфяных почв на уровне высотных поясов // Почвоведение. 2019. № 8. С. 923–934.
- Захарихина Л. В., Литвиненко Ю. С. Эколого-геохимические изменения компонентов природной среды терри-

- тории медно-никелевого месторождения (Центральная Камчатка) // Геогр. и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 49–59.
- Инишева Л. И., Цыбукова Т. Н. Эколого-геохимическая оценка торфов юго-востока Западно-Сибирской равнины // Геогр. и природ. ресурсы. 1999. № 1. С. 45–51.
- Кашулина Г. М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Колском полуострове // Почвоведение. 2017. Т. 50. № 7. С. 860–873.
- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшифилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Методика измерений массовой доли ванадия, кадмия, кобальта, марганца, меди, мышьяка, никеля, ртути, свинца, хрома и цинка в пробах почв, грунтов и донных отложений методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915 МД. М., 2009. 41 с.
- Мирошников А. Е., Стримжа Т. П., Смолянинова Л. Г., Анцифорова О. В., Кочнева Н. А., Кузнецова В. В., Максимова С. В. Оценка территориального экологического равновесия Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. 192 с.
- Московченко Д. В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 768 с.
- Пьявченко Н. И., Корнилова Л. И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
- Саит Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Семенов И. Н., Королева Т. А. Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // Почвоведение. 2019. Т. 52. № 10. С. 1259–1268.
- Сорокина Е. П., Кулачкова О. Г., Онищенко Т. Л. Сравнительный геохимический анализ воздействия на окружающую среду промышленных предприятий различного типа // Методы изучения техногенных геохимических аномалий. М.: ИМГРЭ, 1984. С. 9–20.
- Степанов В. М. Гидрогеологическая зональность в горных районах Восточной Сибири // Тр. II совещ. по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Вып. I. Иркутск, 1959. С. 71–84.
- Сысо А. И. Геохимические и агрохимические особенности низинных торфяных почв юга Западной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 1996. № 1. С. 87–93.
- Теплицын В. Л., Ваймер А. А. Гидроморфные и полугидроморфные почвы геосистем Западной Сибири и их рациональное использование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 230 с.
- Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных: учебник. 3-е изд. М.: Бином-Пресс, 2007. 515 с.
- Шарафутдинов Р. А. Геохимические свойства и минеральный состав торфяных отложений южной лесостепи Минусинской котловины и горной тайги Центральной части Западного Саяна: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23. Томск. 2006. 20 с.
- Bao K., Wang G., Pratte S., Mackenzie L., Klamt A. M. Historical variation in the distribution of trace and major elements in a poor fen of Fenghuang Mountain, NE China // Geochem. Int. 2018. V. 56. N. 10. P. 1003–1015.
- Bao K., Wang G., Jia L., Xing W. Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: geochemical records of peat and altitude effects // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. V. 26. N. 8. P. 7512–7524.
- Beznosikov V. A., Lodygin E. D., Kondratenok B. M. Assessment of background concentrations of heavy metals in soils of the northeastern part of European Russia // Euras. Soil Sci. 2007. V. 40. Iss. 9. P. 949–955 (Original Rus. Text © V. A. Beznosikov, E. D. Lodygin, B. M. Kondratenok, 2007, publ. in Pochvovedenie. 2007. N. 9. P. 1064–1070).
- Bindler R. Mired in the past – looking to the future: geochemistry of peat and the analysis of past environmental changes // Glob. Planet Change. 2006. V. 53. Iss. 4. P. 209–221.
- Bogush A. A., Bobrov V. A., Klimin M. A., Bychinskii V. A., Leonova G. A., Krivonogov S. K., Kondrat'eva L. M., Preys Yu. I. Sedimentation and Accumulation of Elements in the Vydrino Peat Bog (Southern Baikal Region) // Rus. Geol. Geophys. 2019. V. 60. N. 2. P. 163–175 (Original Rus. Text © A. A. Bogush, V. A. Bobrov, M. A. Klimin, V. A. Bychinskii, G. A. Leonova, S. K. Krivonogov, L. M. Kondrat'eva, Yu. I. Preis, 2019, publ. in Geologiya i geofizika. 2019. V. 60. N. 2. P. 194–208).
- Efremova T. T., Efremov S. P. Ecological and geochemical assessment of heavy-metal and sulfur pollution levels in hilly peatbogs of southern Taimyr // Contemp. Probl. Ecol. 2014. N. 7. P. 685–693 (Original Rus. Text © T. T. Efremova, S. P. Efremov, 2014, publ. in Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2014. N. 6. P. 965–974).
- Efremova T. T., Efremov S. P., Melent'eva N. V., Avrova A. F. Formal criteria for the humus status of mountainous peat soils in altitudinal zones // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. Iss. 8. P. 892–902 (Original Rus. Text © T. T. Efremova, S. P. Efremov, N. V. Melent'eva, A. F. Avrova, 2019, publ. in Pochvovedenie. 2019. V. 52. N. 8. P. 923–934).
- Gerdol R., Bragazza L. Effects of altitude on element accumulation in alpine moss // Chemosphere. 2006. V. 64. Iss. 5. P. 810–816.
- Heinrichs H., Mayer R. Distribution and cycling of major and trace elements in two Central European forest ecosystems // J. Env. Qual. 1977. V. 6. Iss. 4. P. 402–407.
- Jia L., Wang G., Liu J. Distribution and implications of major and trace elements in peat profiles of Yuanchi, Changbai Mountain // J. Mt. Sci. 2006. V. 24. P. 662–666 (in Chinese with English abstract).
- Kashulina G. M. Extreme pollution of soils by emissions of the copper-nickel industrial complex in the Kola Peninsula // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. Iss. 7. P. 837–849 (Original Rus. Text © G. M. Kashulina, 2017, publ. in Pochvovedenie. 2017. N. 7. P. 860–873).
- Pratte S., Bao K., Shen J., Mackenzie L., Klamt A., Wang G., Xing W. Recent atmospheric metal deposition in peatlands of northeast China: a review // Sci. Total Environ. 2018. V. 626. P. 1284–1294.
- Semenkov I. N., Koroleva T. V. International environmental legislation on the content of chemical elements in soils: guidelines and schemes // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. Iss. 10. P. 1289–1297 (Original Rus. Text © I. N. Semenov, T. V. Koroleva, 2019, publ. in Pochvovedenie. 2019. V. 52. N. 10. P. 1259–1268).

- Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb, and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland // *Water Air Soil Pollut.* 1996. V. 90. Iss. 3–4. P. 375–405.
- Vodyanitskii Yu. N., Savichev A. T., Trofimov S. Ya., Shishkonakova E. A. Accumulation of heavy metals in oil-contaminated peat soils // *Euras. Soil Sci.* 2012. V. 45. Iss. 10. P. 977–982 (Original Rus. Text © Yu. N. Vodyanitskii, A. T. Savichev, S. Ya. Trofimov, E. A. Shishkonakova, 2012, publ. in *Pochvovedenie*. 2012. N. 10. P. 1109–1114).
- Volkova I. I., Baikov K. S., Syso A. I. Kuznetsk Alatau mires as filters for natural waters // *Contemp. Probl. Ecol.* 2010. V. 17. N. 3. P. 265–271 (Original Rus. Text © I. I. Volkova, K. S. Baikov, A. I. Syso, 2010, publ. in *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal*. 2010. V. 17. N. 3. P. 379–388).

ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SWAMP SPRUCE FORESTS PEAT SOILS OF KUZNETSK ALATAU

T. T. Efremova¹, O. A. Shapchenkova¹, S. P. Efremov¹, A. F. Avrova¹, M. V. Sedel'nikov²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, mike.sedelnikov@yandex.ru

The studies were carried out in forest peat soils of swampy river valleys of the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau. The content of macro- and microelements in the layer of modern soils (0–30 cm) varies greatly (Cv 42–88 %). The weighted average amount (taking into account the thickness of soil horizons and peat areas) within the orographic profile of 1087–573 m a. s. l. is: $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$, mg/kg. The methods of multidimensional statistical analysis have been used to structure peat soils according to the content of ash elements into three clusters corresponding to altitudinal gradient – 1087, 832–622, 573 m a. s. l. Zn and Fe have the greatest discriminating ability (82.6 %). A smaller share of the difference is provided by Cu, Ni (17.4 %). The topographic series of river valley peat soils are determined by the hydrogeochemical zonality of groundwater, as well as the removal of elements by lateral migration flows. For the first time, the boundaries of the vertical altitudinal zonality of peat soils are statistically were proved by the content of mineral elements and the geochemical composition of the selected ecotopic series (clusters) of soils is characterized. Only Pb and Cd accumulate in the soils of the autonomous landscape (highlands). In comparison with it, in the cluster of soils of the middle highlands, the amount of most ash elements increases by an average of 2 times. In the low mountains, the intensity of accumulation weakens somewhat. In the soil profile, the radial geochemical migration of iron as a characteristic element of swamps is more strongly positively correlated with the ash content of the peat substrate, strontium – with the soil pH, Cu and Mn – with fulvic acids. In the current period, no technogenic degradation of peat soils of the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau has been detected. The ecological and geochemical features of mountain peat soils are consistent with the characteristics of the natural biogeochemical provinces on the south of Central Siberia, within which they develop.

Keywords: mountain peat soils, geochemistry of elements, pollution, formalized classification, multidimensional statistical analysis.

How to cite: Efremova T. T., Shapchenkova O. A., Efremov S. P., Avrova A. F., Sedel'nikov M. V. Ecological-geochemical assessment of swamp spruce forests peat soils of Kuznetsk Alatau // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 14–25 (in Russian with English abstract).