

УДК 631.415, 631.445.124
doi: 10.17223/19988591/41/8

Т.Т. Ефремова, С.П. Ефремов, Н.В. Мелентьева, А.Ф. Аврова

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

Высотная дифференциация кислотно-основных свойств долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау

Впервые методами многомерного статистического анализа выполнена объективная группировка долинных торфяных почв по кислотно-основным показателям, которая отражает высотно-поясные закономерности компонентов биогеосистем восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Наибольший вклад в дискриминацию вносит насыщенность почвенного поглощающего комплекса щелочноземельными основаниями и потенциальная кислотность (pH солевой). Выделено три геохимические ассоциации торфяных почв: кислые ненасыщенные кальцием и магнием в высокогорном поясе 1 500–1 100 м над ур. м., слабокислые слабонасыщенные основаниями в среднегорье 1 100–800 и нейтральные умереннонасыщенные ($Ca+Mg$) в низкогорье 800–500 м над ур. м. Почвы различных гипсометрических ступеней рельефа в процессе торфогенеза воспроизводят общие признаки органогенного почвообразования – ацидификацию поверхностных горизонтов. Предложена высокоточная регрессионная модель прогноза значений обменной кислотности ($pH_{КС}$) по величине активной (pH_{H_2O}). Состояние древостоев болотных ельников может служить одним из объективных критериев изменения регионального климата в сторону сухости.

Ключевые слова: горные торфяные почвы; $pH_{КС}$; pH_{H_2O} ; гидролитическая кислотность; насыщенность основаниями; геохимические ассоциации; многомерный статистический анализ.

Введение

Обоснованные прогнозы реакции болот на угрозы глобального изменения климата и техногенного загрязнения природной среды нуждаются в оценке специфики современного торфогенеза в масштабах крупных регионов. Однако недостаточная проработанность этой проблемы сохраняется до настоящего времени. Существуют, в частности, сильно различающиеся экспертные оценки степени заболоченности горных территорий юга Сибири. С одной стороны, говорится о слабом развитии процессов болотообразования [1, 2], с другой – отмечается широкое распространение болот в Алтае-Саянской горной стране [3]. При этом достаточно полно приводятся их флористический состав и значительно в меньшей мере характеризуются свойства горных торфяных почв. Под названием болотные они включены в систематический список почв Западного Саяна и Кузнецкого Алатау [4, 5],

ограничиваясь в то же время некоторыми физико-химическими показателями верхних торфяных горизонтов 0–5(10) см. В последнее время выполнена оценка промышленных выбросов Кузбасса на экологическое состояние болотных экосистем западного макросклона Кузнецкого Алатау [6]. Более подробные сведения о свойствах торфяных и гидроморфных почв, особенностях их районирования и рекомендации по хозяйственному освоению относятся к предгорной области Западного Саяна [7–10].

Важнейшей характеристикой физико-географического облика гор является, как известно, структура вертикальных почвенных поясов, множественность и внутренняя неоднородность которых в Алтае-Саянской горной стране приведена в работах [4, 5]. Вместе с тем в этих построениях торфяные почвы практически не представлены. Болотные экосистемы различных высотных поясов питаются, как известно, преимущественно подземными водами, которые выходят на поверхность благодаря резкой расчлененности рельефа, неодинаковой степени трещиноватости горных пород и наличию тектонических разломов. Разгрузка вод происходит обычно по горным склонам и речным долинам, которые, как правило, заболочены.

Построение топографических рядов долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау является целью настоящей работы. Понятно, что в условиях гидроморфного почвообразования режим увлажнения не может служить фактором дифференциации торфяных почв по ступеням рельефа. Поэтому в качестве критерия их вертикальной структурной организации использовали кислотно-основные свойства, которые играют ключевую роль в организации биогеоценологических процессов в болотных экосистемах, положены в основу классификации торфяных почв [11, 12] и принадлежности почв к геохимическим ассоциациям [13].

Материалы и методики исследования

Объектами исследования послужили торфяные почвы бассейнов рек Белый Июс и Черный Июс, приуроченные к различным ступеням высот восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Климат резко континентальный с холодной зимой и жарким летом. Увлажнение избыточное: коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову 1,75–2,4 [14].

В высокогорной области образцы торфяных почв отобраны на двух объектах. Торфяной массив Арапат площадью 1,8 га залегает на абсолютной высоте 1 460 м в естественном чашеобразном углублении (кресловине) горы Столовая с многолетним снежником (рис. 1). Географические координаты отбора почвенных образцов 54°41'04"N, 88°39'58"E. Торфяной массив Пихтерек (0,83 тыс. га) с горизонтами сезонной мерзлоты и перелеток расположен в заболоченной долине р. Пихтерек на абсолютной высоте 1 087 м (54°05'17"N, 89°05'49"E). В напочвенном покрове высокогорной области господствуют светолюбивые виды гипновых, сфагновых и зеленых мхов: проективное

покрытие 85–100%. Доминируют: *Sphagnum*, *Tomenthypnum*, *Aulacomnium*, *Helodium*, *Calliergon*, *Polytrichum*, *Dicranum*, *Tuidium*, *Funaria*, *Bryum*.

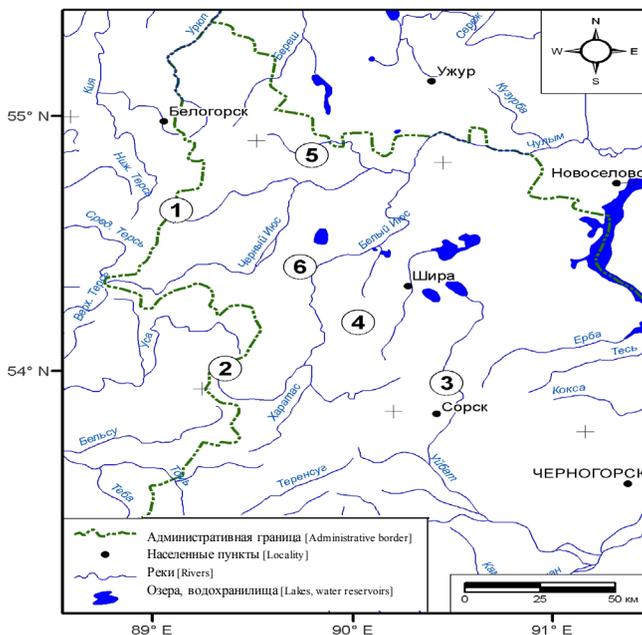


Рис. 1. Карта-схема расположения изучаемых торфяных массивов Кузнецкого Алатау:

1 – Арарат; 2 – Пихтерек; 3 – Бюря; 4 – Тунгузуль; 5 – Печище; 6 – Тарча

[Fig. 1. The schematic location map of the studied peatlands in the Kuznetsk Alatau:

1 - Ararat (54°41'04"N, 88°39'58"E); 2 - Pihterek (54°05'17"N, 89°05'49"E);

3 - Vyurya (54°07'41"N, 90°15'31"E); 4 - Tunguzhul' (54°16'32"N, 89°39'02"E);

5 - Pechysche (54°57'54"N, 89°18'08"E); 6 - Tarcha (54°31'23"N, 89°21'13"E)]

В пределах плоскогорья образцы почв отобраны в заболоченных межгорных долинах четырех рек, названия которых соответствуют наименованию объектов исследования. Торфяной массив Бюря (0,65 тыс. га) залегает на высоте 832 м Батеневского кряжа (54°07'41"N, 90°15'31"E). Массив Тунгузуль (1,77 тыс. га) расположен на абсолютной высоте 622 м (54°16'32"N, 89°39'02"E). Торфяной массив Печище (0,62 тыс. га) дислоцируется на высоте 573 м Солгонского кряжа (54°57'54"N, 89°18'08"E). Торфяной массив Тарча (1,8 тыс. га) сформирован вдоль подножья хребта Арга на высоте 547 м (54°31'23"N, 89°21'13"E).

Торфяные массивы заняты хвойными и хвойно-лиственными древостоями с доминированием ели сибирской. Преобладают разновозрастные ельники гипново-зеленомошной группы типов леса. В ассоциациях напочвенного покрова господствующий ярус мхов занимает 90–95%. Доминируют: *Tomenthypnum*, *Aulacomnium*, *Helodium*, *Drepanocladus*, *Calliergon*,

Pleurozium, Polytrichum, Hylocomium, Dicranum Rhytiadelphus, Tuidium, Brium, Ptilium. Исследованиями охвачена сфера современного почвообразования (корненасыщенная зона) – 0–30(40) см, которая ограничивалась в том числе наличием в профиле торфяных залежей мерзлотных горизонтов. Для отбора образцов почв вырезались торфяные монолиты размером 25×25×30(40) см и подразделялись на генетические горизонты. На каждом объекте отобрано по 5–6 монолитов сообразно доминирующим растительным ассоциациям. Торфяные почвы всех гипсометрических отметок слагаются торфами моховой группы. Верхние слабо разложившиеся горизонты 0–5(7) см характеризуются нормальной зольностью (7–11%). Нижние анализируемые слои 7–30(40) см отличаются повышенной зольностью (17–49%) и более высокой разложенностью торфа (28–34%).

Кислотно-основные свойства почв определялись по руководству [15]: рН водной (водная вытяжка), рН солевой (вытяжка 1М КСl), общая потенциальная – гидролитическая кислотность (вытяжка 1М CH_3COONa), найденную величину кислотности умножали на эмпирический коэффициент 1,75. Сумму обменных катионов (по Каппену–Гильковицу) находили в вытяжке 0,1М НСl, в которой комплексометрическим титрованием определяли $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$. По разности между суммой и количеством $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ находили содержание прочих (не идентифицированных) катионов. Степень насыщенности почв основаниями, выраженная в %, рассчитывалась как доля обменных оснований к сумме (обменные основания + гидролитическая кислотность) и оценивалась согласно [16]. Реакцию среды характеризовали по [15]. Степень разложения устанавливали объемно-весовым методом [17]. Многомерный статистический анализ выполнен в программе EXCEL и StatSoft STATISTICA 6.0 [18].

Результаты исследования и обсуждение

Заболоченные речные долины восточного склона Кузнецкого Алатау характеризуются средней и значительной вариацией признаков, которые используются для оценки кислотно-основных свойств почв: рН водной вытяжки 4,7–7,7, рН солевой вытяжки 3,8–6,9, гидролитическая кислотность 3,5–81,1 ммоль(+)/100 г, сумма поглощенных оснований 110–387, обменные щелочноземельные катионы 43,6–357, емкость катионного обмена 170–392 ммоль(+)/100 г. Все показатели тесно связаны между собой: индекс детерминации (R^2) составляет 0,71–0,94. Чтобы сопоставить кислотно-основные свойства торфяных почв, сформированных на разных абсолютных высотах, обратились к концепции кислотного следа почвообразования посредством создания *V*-диаграмм [19, 20]. Для построения диаграмм применили понятие функциональной зависимости между варьирующими признаками. В качестве аргумента использовали показатели степени насыщенности щелочноземельными основаниями, в качестве функции – величины рН водной и рН солевой.

Кислотный след почвообразования в высокогорной торфяной почве массива Арарат отличается монотонностью, судя по величине кислой реакции среды (рН водной), сильной ненасыщенности почвенного поглощающего комплекса (ППК) щелочноземельными основаниями, практически одинаковым содержанием ионов водорода H^+ и прочих катионов по всей стратиграфической колонке (рис. 2, А; 3, А).

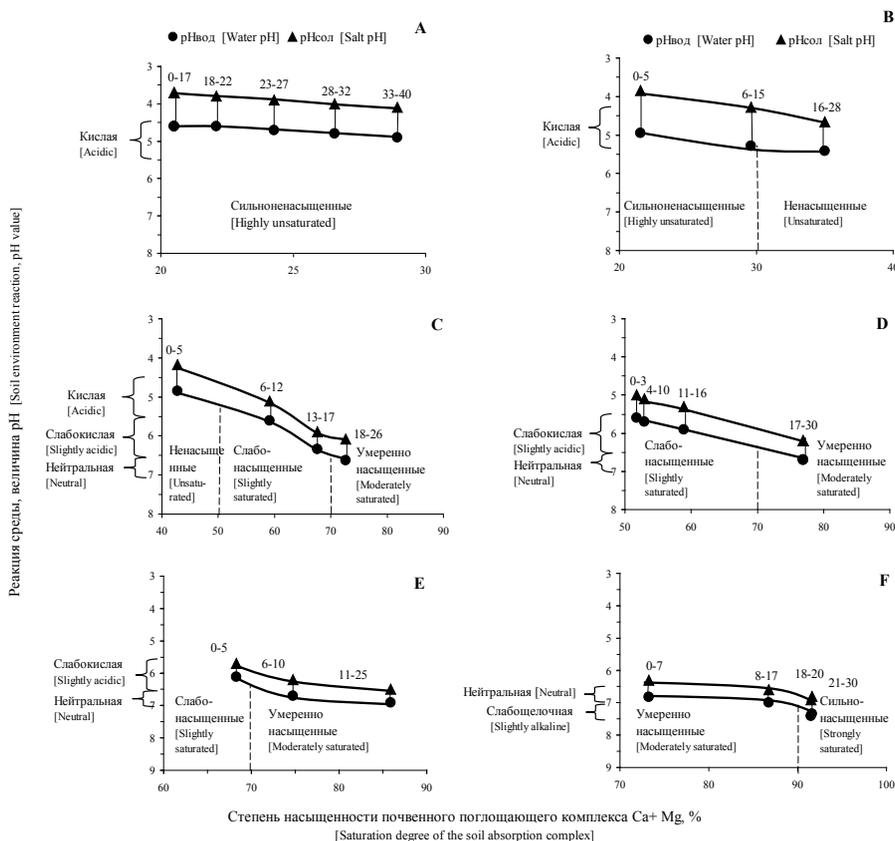


Рис. 2. Распределение в поле кислотности V-диаграммы генетических горизонтов почв горных торфяников: А – Арарат; В – Пихтерек; С – Бюря; D – Тарча; E – Печище; F – Тунгузюль

[Fig. 2. V-diagrams: distribution of soil genetic horizons of mountain peatlands in acidity fields: A - Ararat; B - Pihterek; C - Byurya; D - Tarcha; E - Pechysche; F - Tunguzhul']

Торфяник Пихтерек (1 087 м над ур. м.) характеризуется сходным кислотным следом почвообразования: профиль находится в интервале кислых показателей рН и не насыщен основаниями (рис. 2, В; 3, В). Отличается от массива Арарат явным проявлением ацидофикации поверхностного горизонта: относительно нижнего анализируемого (16–28 см) наблюдается примерно вдвое повышение ионов H^+ и снижение щелочноземельных оснований в составе ППК.

Горизонтограмма массива Бюря (832 м над ур. м.) характеризует дифференцированный кислотный след почвообразования в ходе торфогенеза (рис. 2, С; 3, С). Нижний анализируемый горизонт торфяного массива умереннонасыщенный (Ca+Mg) с нейтральной реакцией среды, по мере роста вверх последовательно трансформируется в слабонасыщенный и слабокислый субстрат, затем в ненасыщенный кислый поверхностный слой (0–5 см). С позиции каскадно-геохимических оценок торфяные почвы массива Бюря можно определить как систему переходного типа, играющую буферную (барьерно-трансляционную) роль в формировании кислотно-основных свойств сопряженных торфяников. Вышележащие торфяные почвы – кислые ненасыщенные щелочноземельными основаниями по всему профилю, расположенные по склону ниже – преимущественно нейтральные, насыщенные в той или иной мере обменными катионами.

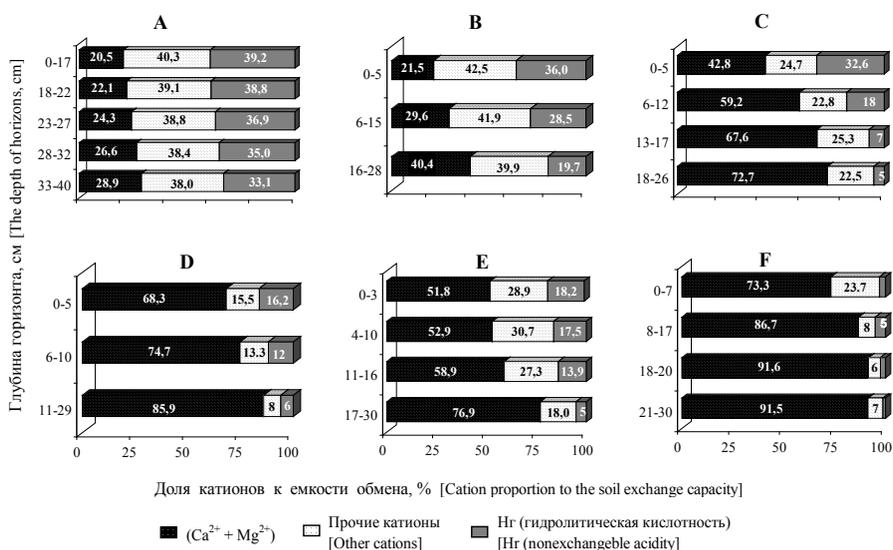


Рис. 3. Доля катионов к емкости обмена горных торфяных почв различных высотных отметок: А – Арарат; В – Пихтерек; С – Бюря; D – Тарча; E – Печище; F – Тунгузюль [Fig. 3. The composition of soil absorption complex of mountain peatlands: A - Ararat; B - Pihterek; C - Vyurya; D - Tarcha; E - Pechysche; F - Tunguzhul']

Так, кислотный след почвообразования массива Тунгузюль (622 м над ур. м.) в нижней части профиля характеризуется слабощелочной реакцией среды и сильнонасыщенными основаниями торфами, преобразуясь в поверхностных слоях до нейтральных значений pH и умеренного насыщения залежи Ca²⁺+Mg²⁺ (рис. 2, F; 3, F). Доля катионов неопределенной природы незначительна и только в поверхностном горизонте (0–7 см) достигает 24%. V-диаграмма массива Печище (579 м над ур. м.) показывает, что уме-

реннонасыщенные (Ca+Mg) с нейтральной реакцией нижние слои залежи сменяются в ходе торфогенеза горизонтами, обедненными основаниями со слабокислой средой (рис. 2, E; 3, E). Близкие характеристики по кислотности среды и степени насыщенности основаниями имеет V-диаграмма почв торфяного массива Тарча (547 м над у. м.), однако отличается несколько возросшей долей не идентифицированных катионов (рис. 2, D; 3, D).

Таким образом, почвы различных гипсометрических ступеней рельефа в процессе торфонакопления воспроизводят в той или иной мере общие признаки органогенного почвообразования – ацидификацию поверхностных горизонтов главным образом за счет поступления органических кислот в составе свежих растительных остатков, а также выноса оснований латеральными миграционными потоками.

Для принятия решения о том, какие показатели (признаки) кислотно-основного состояния лучше всего различают (дискриминируют) обсуждаемые торфяные почвы, воспользовались процедурой дискриминантного анализа. Построенная по кислотно-основным свойствам модель, судя по статистике Уилкса и ее оценкам, показывает: статистически значимыми дискриминаторами почв торфяных массивов являются содержание обменных щелочно-земельных оснований и pH солевой вытяжки, при этом вклад последнего показателя более мощный (табл. 1).

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

Оценка вклада кислотно-основных показателей в дискриминацию торфяных почв и формирование кластеров
[Evaluation of the acid-base parameters' contribution into discrimination of peat soils and cluster formation]

Переменные модели [Parameters of models]	Лямбда Уилкса [Wilks' Lambda]	Частная лямбда [Partial Lambda]	F-критерий [F-statistics]	p-уровень [p-level]
Почвы торфяных массивов [Peatland soils]				
Оценка качества дискриминации: лямбда Уилкса – 0,224, F-критерий – 13,37, p-уровень значимости <0,001 [Evaluation of discrimination quality: Wilks' Lambda - 0.224, F-statistics - 13.37, p-level - <0.001]				
Ca + Mg, % к емкости обмена [Ca+Mg, % of exchange capacity]	0,272	0,822	2,60	0,034
pH солевой [Salt pH]	0,423	0,528	10,71	<0,001
Совокупности (кластеры) торфяных почв [Peat soil clusters]				
Оценка качества дискриминации: лямбда Уилкса – 0,163, F-критерий – 46,51, p-уровень значимости <0,001 [Evaluation of discrimination quality: Wilks' Lambda - 0.163, F-statistics - 46.51, p-level - <0.001]				
Ca + Mg, % к емкости обмена [Ca+Mg, % of exchange capacity]	0,32	0,52	29,5	<0,001
pH солевой [Salt pH]	0,19	0,84	6,1	0,004

Итоговое предсказание корректно классифицированных объектов составляет 55%. Лучше других дискриминируется торфяной массив Пихтерек, хуже всех – Бюра (табл. 2).

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

**Оценка межгрупповой дисперсии торфяных массивов
методом дискриминантного анализа**
[Evaluation of intergroup variance of peatlands by the method of discriminant analysis]

Торфяные массивы, нумерация [Peatlands, number]	Квадраты расстояний Махаланобиса, p -уровни значимости различий [The squared Mahalanobis distance, p -levels of significance]						Матрица классификации [Classification matrix]						
	1	2	3	4	5	6	% попадания [Percent correct]	1	2	3	4	5	6
								Число попаданий [Number of correct cases]					
1. Арарат [Ararat]	—	1,3	8,5	24,1	17,1	17,6	57	4	3	0	0	0	0
2. Пихтерек [Pihterek]	0,07	—	3,9	15,6	9,4	10,6	92	1	11	0	0	0	0
3. Бюря [Vyurya]	<0,01	<0,01	—	4	1,9	1,7	38	0	4	6	6	0	0
4. Тунгужуль [Tunguzhul]	<0,01	<0,01	<0,01	—	1,5	0,5	67	0	0	0	8	4	0
5. Печище [Pechysche]	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	—	0,9	67	0	0	4	0	8	0
6. Тарча [Tarcha]	<0,01	<0,01	0,02	0,30	0,13	—	0	0	0	3	5	0	0
							Итоги классификации [Classification result]						
							55	5	18	13	19	12	0

Примечание. Квадраты расстояний Махаланобиса – над чертой, p -уровни значимости различий – под чертой.

[Note. The squared Mahalanobis distance is above the line, p -levels of significance are below the line].

Используя квадраты расстояния Махаланобиса (см. табл. 2) как меру сходства или различия почв, разместили торфяные массивы в двумерном пространстве кислотно-основных показателей с помощью метода многомерного шкалирования. Изучаемые массивы четко образовали на плоскости три случайных кластера (рис. 4).

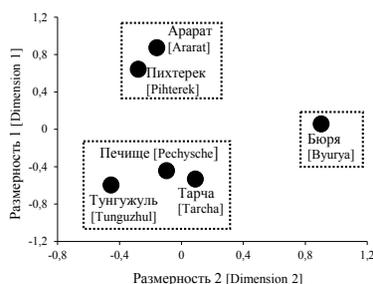


Рис. 4. Расположение на плоскости торфяных массивов, сгруппированных по кислотно-основным показателям почв
[Fig. 4. The location on the plane of peatlands, grouped according to acid-base soil properties]

Полученные группировки статистически значимо различаются между собой (табл. 3).

Т а б л и ц а 3 [Table 3]

**Оценка межгрупповой дисперсии кластеров
торфяных массивов методом дискриминантного анализа**
[Evaluation of intergroup variance of peatland clusters by the method of discriminant analysis]

Индекс кластера [Cluster index]	Структура кластера [Cluster structure]	Квадраты расстояний Махаланобиса, p -уровни значимости [The squared Mahalanobis distance, p -levels]			Матрица классификации [Classification matrix]			
		1–2	3	4–6	% попадания [Percent correct]	1–2	3	4–6
						Число попаданий [Number of correct cases]		
1–2	Арагат, Пихтерек [Ararat, Pihterek]	—	13,1	26,9	100	19	0	0
3	Бюря [Буура]	<0,001	—	2,6	75	0	12	4
4–6	Тунгужуль, Печище, Тарча [Tunguzhul, Pechysche, Tarcha]	<0,001	<0,001	—	90	0	3	28
					Итоги классификации [Classification result]			
					89	19	15	32

Примечание. Квадраты расстояний Махаланобиса – над чертой, p -уровни значимости различий – под чертой.

[Note. The squared Mahalanobis distance is above the line, p -levels of significance are below the line].

Итог классификации возрастает до 89% по сравнению с 55% для почв отдельных торфяных массивов. Доминирующий вклад в формирование кластеров вносит показатель насыщенности щелочноземельными основаниями ППК и величина рН солевой (табл. 1).

Комбинация торфяных почв по кислотно-основным свойствам, характеризующая их хорологическую организацию, согласуется с высотно-поясной структурой растительного покрова автоморфных местообитаний восточного макросклона Кузнецкого Алатау [21] и с гидрогеохимической зональностью подземных вод горных территорий [22, 23]. Так, торфяные почвы кластера Арагат–Пихтерек (>1 100 м абсолютных отметок) формируются в границах альпийско-тундровых и субальпийских комплексов и питаются ультрапресными кислыми гидрокарбонатными водами, состав катионов которых отличается большой пестротой. Торфяной массив Бюря приурочен к горно-таежному поясу (1 100–800 м) пресных гидрокарбонатно-кальциевых слабокислых вод. Кластер Тунгужуль–Печище–Тарча находится в подтаежно-лесостепном поясе (800–500 м), торфяные массивы которого формируются жесткими слабощелочными гидрокарбонатно-кальцево-магниевыми водами. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования в качестве базовых критериев классификации болот их геоморфологические и гидрологические особенности [24].

Организованные группы торфяных массивов, согласно средней величине активной кислотности, характеризуются в высокогорном поясе кислыми ненасыщенными щелочноземельными основаниями почвами, в среднегорье – слабокислыми слабонасыщенными, в низкогорье – нейтральными умереннонасыщенными кальцием и магнием почвами. По величине обменной кислотности (рН солевой) торфяные почвы отличаются соответственно сильнокислой, слабокислой и близкой к нейтральной реакцией среды (табл. 4). Принципиальное различие между горными торфяниками низких, средних высот и высокогорий по кислотно-основным свойствам отмечается также в тропических и субтропических областях [25, 26]. Внутригрупповая пространственная вариация кислотности выражена в основном слабо. Насыщенность основаниями изменяется в большей мере, но не превышает 33%, что позволяет характеризовать каждый кластер как однородную совокупность согласно [27].

Т а б л и ц а 4 [Table 4]

Статистическая оценка кислотно-основных показателей кластеров торфяных почв различных высот
[Statistical evaluation of acid-base parameters of peat soil clusters of different altitude points]

Кислотно-основные показатели [Acid-base parameters]	Кластеры почв торфяных массивов [Soil clusters of peatlands]					
	Арагат, Пихтерек [Ararat, Pihterek] 1100–1500 м		Бюря [Byurya] 830 м		Тунгужуль, Печише, Тарча [Tunguzhul, Pechysche, Tarcha] 550–620 м	
	$\frac{M \pm m}{lim}$	$C_v, \%$	$\frac{M \pm m}{lim}$	$C_v, \%$	$\frac{M \pm m}{lim}$	$C_v, \%$
рН водный [Water pH]	$\frac{5,1 \pm 0,05}{4,6-5,6}$	6	$\frac{5,9 \pm 0,13}{4,9-6,6}$	12	$\frac{6,6 \pm 0,10}{5,6-7,4}$	9
рН солевой [Salt pH]	$\frac{4,2 \pm 0,07}{3,7-4,9}$	9	$\frac{5,3 \pm 0,14}{4,2-6,1}$	14	$\frac{6,1 \pm 0,09}{5,0-6,8}$	9
Насыщенность Ca+Mg [Saturation with Ca+Mg], %	$\frac{28,9 \pm 1,41}{19,7-42,4}$	27	$\frac{60,6 \pm 2,34}{42,8-72,7}$	22	$\frac{78,5 \pm 2,01}{51,8-93,8}$	15
Оценка современных торфяных почв 0–30(40) см по средним значениям кислотно-основных показателей [Evaluation of modern peat soils, 0-30(40) cm, for mean values of acid-base parameters]						
Насыщенность Ca+Mg [Saturation with Ca+Mg], %	Ненасыщенные [Unsaturated]		Слабонасыщенные [Slightly saturated]		Умереннонасыщенные [Moderately saturated]	
рН водный [Water pH]	Кислые [Acidic]		Слабокислые [Slightly Acidic]		Нейтральные [Neutral]	

Примечание. M – среднее арифметическое, $\pm m$ – ошибка средней арифметической, lim – пределы изменчивости, C_v – коэффициент вариации.

[Note. M - mean, $\pm m$ - standard error of the mean, lim - limits of variation, C_v - coefficient of variation].

Чтобы оценить влияние кислотных и основных компонентов на величину pH солевой, статистически значимого дискриминатора торфяных почв, выполнили пошаговый регрессионный анализ с использованием данных по обменным Ca+Mg, величине гидролитической (общей) кислотности и «прочим обменным катионам». В составе последних могут быть K^+ , Na^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} и другие ионы [28]. В кислых ненасыщенных щелочноземельными основаниями высокогорных торфяных почвах величина обменной кислотности (pH_{KCl}) на 96% аппроксимируется перечисленными показателями (табл. 5). В эту совокупность, судя по частному индексу детерминации, 94,5% вносит гидролитическая кислотность. Вклад обменных оснований не превышает 1% и находится на грани статистической значимости.

Показатель pH солевой вытяжки свидетельствует о наличии в почве только наиболее сильнокислотных обменных компонентов: в минеральных почвах – обменного алюминия, в органогенных горизонтах почв – присутствие обменного водорода [29]. В торфяных почвах это, прежде всего, ионы водорода низкомолекулярных органических и специфических гумусовых кислот. Ранее нами установлено: а) все виды кислотности в растительном субстрате (подстилке) тесно с большой долей вероятности взаимосвязаны, б) в качестве наиболее значимых прогностических показателей общей потенциальной кислотности алгоритм множественного регрессионного анализа чаще всего включал в модель гумусовые кислоты 1-й фракции (ГК-1+ФК-1) и фульвокислоты фракции 3, в) оксид алюминия из комбинации объясняющих признаков обнаруживает с потенциальной кислотностью наименьшую тесноту связи [30]. Роль алюминия (III) в качестве донора протонов слабо выражена и в торфяных горизонтах арктических почв разного генезиса [31].

В слабокислых и слабонасыщенных основаниями среднегорных торфяных почвах также установлена доминирующая роль иона водорода в формировании обменной кислотности. Статистически значимым становится вклад щелочноземельных оснований около 1%, а прочие обменные катионы оказываются вне модели.

В нейтральных умереннонасыщенных почвах низкогогорья обсуждаемые кислотно-основные показатели аппроксимируют величину pH_{KCl} на 85%. Основной вклад (78%) вносят щелочноземельные основания. Лепта гидролитической кислотности и прочих обменных катионов статистически значима и составляет немногим более 3%. Итак, в торфяных почвах восточного склона Кузнецкого Алатау ведущая роль в формировании обменной кислотности (pH_{KCl}) в условиях нейтральной среды принадлежит поглощенным щелочноземельным основаниям, в кислой – ионам водорода преимущественно органических и гумусовых кислот.

Информацию о кислотности почв как специфического отражения процессов почвообразования можно рассматривать через взаимосвязанные показатели pH_{H_2O} и pH_{KCl} . Установлена положительная связь величины pH солевой и pH водной, которая иллюстрируется диаграммой разброса точек вокруг линии регрессии по типу линейной функции (рис. 5, А).

Т а б л и ц а 5 [Table 5]

**Результаты пошагового регрессионного анализа связи рН солевой
и кислотно-основных показателей в кластерах торфяных почв**
[The results of stepwise regression analysis based on the relationship
of salt pH and acid-base parameters in peat soil clusters]

Кислотно-основные показатели, ммоль(+)/100 г [Acid-base parameters]	Индексы детерминации, R^2 [Determination index]		Частный F -крите- рий [Partial F -statistics]	p -уро- вень [p -level]
	множествен- ный [Multiple]	частный [Partial]		
Кластер высокогорных торфяных почв массивов Арарат–Пихтерек (более 1000 н.у.м.) [The cluster of highland peat soils of Ararat-Pihterek peatlands (more than 1000 m a.s.)]				
Качество модели: $R^2 - 0,959$, $F - 209$, p -уровень $<0,001$, среднеквадратичная ошибка – 0,08 [Quality of model: $R^2 - 0.959$, $F - 209$, p -level <0.001 , root-mean square error - 0.08]				
Гидролитическая кислотность [Nonexchangeable acidity]	0,946	0,946	506,21	$<0,001$
Обменные Са + Mg [Exchangeable Ca+Mg]	0,953	0,007	3,99	0,056
Прочие обменные основания [Other cations]	0,959	0,006	4,07	0,054
Кластер среднегорных торфяных почв массива Бюра (832 н.у.м.) [The cluster of upland peat soils of Byura peatlands (832 m a.s.)]				
Качество модели: $R^2 - 0,988$, $F - 1162$, p -уровень $<0,001$, среднеквадратичная ошибка – 0,09 [Quality of model: $R^2 - 0.988$, $F - 1162$, p -level <0.001 , root-mean square error - 0.09]				
Гидролитическая кислотность [Nonexchangeable acidity]	0,979	0,979	1400,43	$<0,001$
Обменные Са + Mg [Exchangeable Ca+Mg]	0,988	0,009	20,33	$<0,001$
Прочие обменные основания [Other cations]	Вне модели [Outside the model]			
Кластер низкогорных торфяных почв массивов Тарча – Печище – Тунгузюль (622–547 н.у.м.) [The cluster of lowland peat soils of Tarcha-Pechysche-Tunguzhul (622-547 m a.s.)]				
Качество модели: $R^2 - 0,851$, $F - 53$, p -уровень $<0,001$, среднеквадратичная ошибка – 0,24 [Quality of model: $R^2 - 0.851$, $F - 53$, p -level <0.001 , root-mean square error - 0.24]				
Обменные Са + Mg [Exchangeable Ca+Mg]	0,785	0,785	109,79	$<0,001$
Гидролитическая кислотность [Nonexchangeable acidity]	0,818	0,033	5,18	0,030
Прочие обменные основания [Other cations]	0,851	0,033	6,25	0,019

Регрессионное уравнение имеет следующий вид:

$$pH_{(KCl)} = 1,18 \times pH_{(H_2O)} - 1,70. \quad (1)$$

Оценка качества регрессионной модели: $R^2 = 0,94$, F -критерий = 1 374 (p -уровень значимости $<0,001$), среднеквадратичная ошибка регрессии = 0,21, p -уровень значимости свободного члена и регрессионного коэффициента $<0,001$. Статистически значимый коэффициент детерминации, величина которого служит индикатором степени подгонки модели, говорит о том, что 94% изменчивости содержания обменной кислотности (рН солевой) объясняется изменчивостью актуальной (рН водной). Чтобы проверить адекватность построенной модели, т.е. установить, соответствует ли модель натурным данным и выполняются ли условия применения метода наименьших квадратов, прибегли к процедуре анализа остатков (разность между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по регрессионному уравнению).

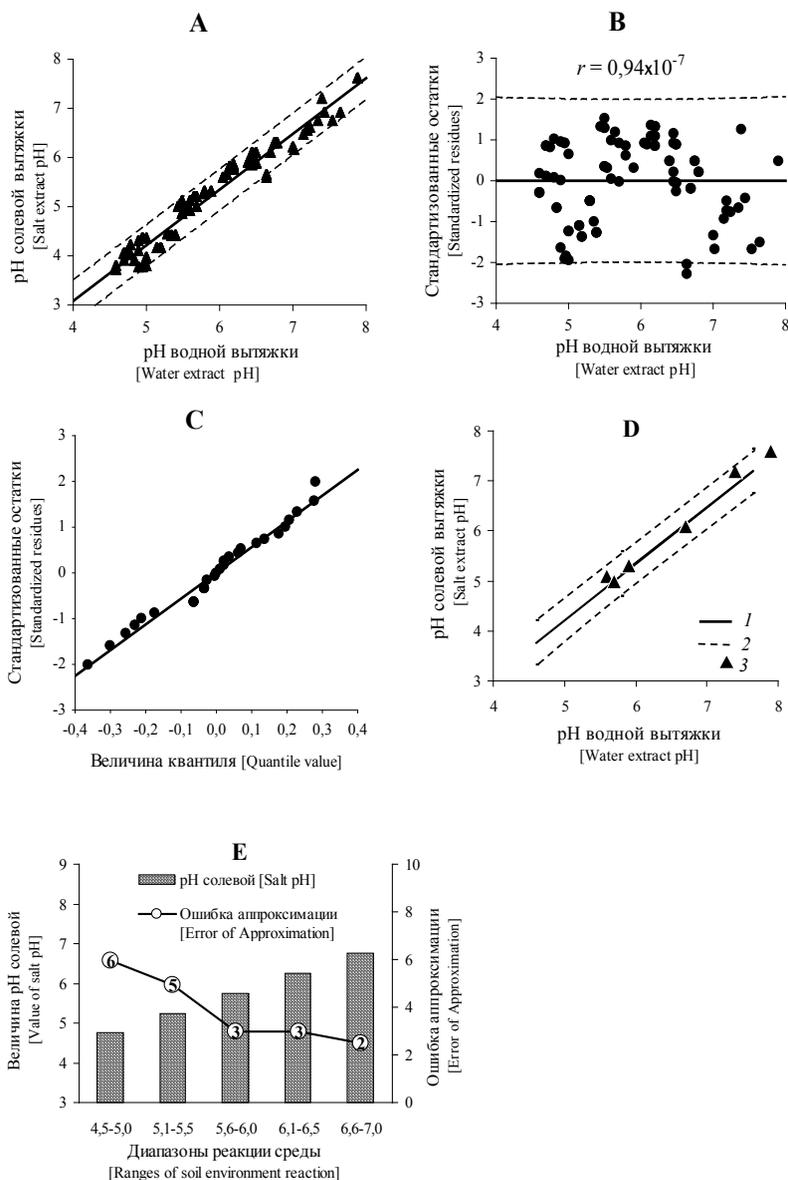


Рис. 5. Регрессионная модель связи величины рН солевой и рН водной вытяжки (А), зависимость стандартизованных регрессионных остатков от рН водной (В), соответствие нормальному распределению регрессионных остатков (С), верификация регрессионной модели по прогнозу величины рН солевой: 1 – прогнозируемые значения; 2 – доверительные интервалы, 3 – эмпирические данные (D), оценка точности прогноза (E). [Fig. 5. Regression relationship between pH of water and pH of salt extracts (A), the dependence of the standardized regression residues from water pH (B), accordance to the normal distribution of regression residues (C), quality test of regression model by the prediction of salt pH: 1 – predicted values, 2 – confidence intervals, 3 – empirical data (D), and estimation of prediction accuracy (E)]

Остатки примерно одинаково часто принимают как положительные, так и отрицательные значения и не обнаруживают зависимости от рН водной как независимой переменной ($r = 0,94 \times 10^{-7}$), что свидетельствует о правильно подобранной модели (см. рис. 5, В). О корректности применения регрессионной прямой в анализе данных говорит и приближенное к нормальному закону распределение остатков: точки диаграммы располагаются практически на одной линии без экстремальных значений (см. рис. 5, С).

Для проверки работоспособности регрессионной модели (верификации) использовали величины рН солевой и рН водной вытяжек торфяных почв, которые не участвовали в моделировании. Наблюдаемые показатели полностью находятся в пределах доверительных интервалов регрессионного уравнения, что также подтверждает высокие прогностические свойства модели (рис. 5, D).

Точность прогноза рассчитывали по формуле (2) и оценивали согласно [32]:

$$A = \left| \frac{y - y_p}{y} \right| \times 100\%, \quad (2)$$

где A – относительная ошибка аппроксимации, %, y – аналитические данные рН солевой вытяжки, y_p – расчетные значения рН_{сол}, $|y - y_p|$ – величины, соответствующие модулю.

Ошибка аппроксимации построенной модели составляет в среднем 3,9%, находится в интервале 2–6 % (см. рис. 5, E), что характеризует высокую и хорошую точность прогноза.

Кластеры торфяных почв по кислотно-основным показателям в соответствии с гипсометрическими ступенями рельефа дают основание, согласно [13, 33], рассматривать эти группировки на уровне парагенетических ассоциаций, которые в каскадной ландшафтно-геохимической системе восточного макросклона Кузнецкого Алатау организуются в следующие почвенные сочетания:

– Кислые по всему профилю торфяные почвы, ненасыщенные кальцием и магнием (<30–50%) в границах альпийско-тундровых и субальпийских комплексов на абсолютных высотах 1 500–1 100 м совместно с горнолуговыми почвами, согласно почвенному районированию [4].

– Слабокислые, слабонасыщенные основаниями (50–70%) в сочетании с горными подзолистыми и бурыми лесными почвами в пределах горнотаежного пояса темнохвойных лесов (1 100–800 м).

– Нейтральные, умеренно насыщенные щелочноземельными основаниями (70–90%) ассоциации торфяных почв подтаежно-лесостепного пояса (800–500 м) в комбинации с горными серыми лесными почвами.

Итак, для каждой геохимической ассоциации горных торфяных почв выделен свой специфический тип почвенных комбинаций, отражающий высотно-поясные закономерности компонентов биогеосистем восточного макросклона Кузнецкого Алатау, согласуясь с высотно-поясной структурой растительного покрова автоморфных местообитаний и гидрогеохимической

поясностью подземных вод. Однако в лесном поясе избыточно увлажненных местопроизрастаний независимо от кислотно-основных свойств торфяных почв формируются главным образом еловые древостои, которые не служат эдикатором кислотности среды, но отражают признаки почвенного гидроморфизма. С позиции поиска природных индикаторов динамики современного климата состояние коренной группы болотных ельников можно рекомендовать в качестве достаточно объективного критерия изменения регионального климата в сторону сухости.

Выводы

1. Впервые в заболоченных речных долинах различных абсолютных высот восточного макросклона Кузнецкого Алатау выполнена объективная группировка торфяных почв по кислотно-основным свойствам в три кластера. Наиболее высокий вклад в дискриминацию вносит степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса щелочноземельными основаниями (Ca + Mg), а также обменная кислотность (pH_{KCl}). Итоговое число классификационных попаданий составляет 89%.

2. Сгруппированные по кислотно-основным свойствам однородные совокупности торфяных почв рассматриваем в качестве геохимических ассоциаций, парагенетически связанных между собой. Обособлены: а) кислые по всему профилю ненасыщенные кальцием и магнием (<30–50%) в границах альпийско-тундровых и субальпийских комплексов на абсолютных высотах 1 500–1 100 м, б) слабокислые слабонасыщенные основаниями (50–70%) в пределах горно-таежного пояса темнохвойных лесов (1 100–800 м), в) нейтральные умеренно насыщенные щелочноземельными основаниями (70–90%) подтаежно-лесостепного пояса (800–500 м).

3. Предложена высокоточная линейная регрессионная модель прогнозных оценок величины обменной кислотности (pH_{KCl}) по данным активной (pH_{H_2O}), приемлемой в практике аналитических исследований.

4. Состояние древостоев болотных ельников в горно-таежном поясе можно отнести к числу достаточно объективных критериев изменения регионального климата в сторону сухости.

Литература

1. Пьявченко Н.И. К изучению болот Красноярского края // Заболоченные леса и болота Сибири. М. : Изд-во АН СССР, 1963. С. 5–32.
2. Семенов В.А. Водные ресурсы // Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад; Всемирный фонд дикой природы (WWF России) / под ред. А.О. Кокорина. М., 2011. С. 52–72.
3. Мульдияров Е.Я., Лапшина Е.Д. К изучению болот Кузнецкого Алатау // Сибирский экологический журнал. 2000. № 5. С. 645–652.

4. Ильиных Н.И. Почвы Кузнецкого Алатау. Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1970. 166 с.
5. Смирнов М.П. Почвы Западного Саяна. М. : Наука, 1970. 236 с.
6. Волкова И.И., Байков К.С., Сысо А.И. Болота Кузнецкого Алатау как естественные фильтры природных вод // Сибирский экологический журнал. 2010. № 3. С. 379–388. doi: 10.1134/S1995425510030021
7. Платонов Г.М. Болота лесостепи Средней Сибири. М. : Наука, 1964. 116 с.
8. Ефремов С.П. Болота зоны КАТЭКа в связи с перспективами их хозяйственного использования и охраны // Почвы зоны КАТЭКа / под ред. В.М. Корсунова, Л.С. Шугалей. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1981. С. 41–56.
9. Ефремова Т.Т. Некоторые вопросы хозяйственного освоения осушенных болот // Почвы зоны КАТЭКа / под ред. В.М. Корсунова, Л.С. Шугалей. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1981. С. 56–65.
10. Кулижский С.П. Эффективный способ использования природоохранных территорий // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2008. № 1. С. 42–56.
11. Пьявченко Н.И., Корнилова Л.И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
12. Морозова Р.М. К вопросу о классификации болотных осушенных почв // Изменение лесоболотных биогеоценозов под влиянием осушения / под ред. Л.С. Козловской, В.М. Медведевой. Петрозаводск : КФ АН СССР, 1986. С. 108–124.
13. Глазовская М.А. Почвы мира. М. : Изд-во МГУ, 1972. 231 с.
14. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 21. Кн. 2. Красноярский край, Тувинская АССР / под ред. Н.С. Смирновой. Л. : Гидрометеиздат, 1990. 408 с.
15. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М. : МГУ, 1970. 487 с.
16. Классификация почв России / под ред. Л.Л. Шишова, Г.В. Добровольского. М. : Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2000. 235 с.
17. Пьявченко Н.И. Степень разложения торфа и методы ее определения. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1963. 56 с.
18. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных : учебник. 3-е изд. М. : Бином-Пресс, 2007. 515 с.
19. Кокотов Ю.А., Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф. Поле кислотности почв как ионообменных систем и диагностика генетических горизонтов // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1448–1459. doi: [10.1134/S1064229314120072](https://doi.org/10.1134/S1064229314120072)
20. Кокотов Ю.А., Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф. Анализ показателей кислотности почвенного профиля и их связи с процессом почвообразования // Почвоведение. 2016. № 1. С. 3–10. doi: [10.1134/S1064229316010087](https://doi.org/10.1134/S1064229316010087)
21. Бочарников М.В., Исмаилова Д.М. Высотная поясность растительного покрова восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. № 6. С. 76–84.
22. Степанов В.М. Гидрогеологическая зональность в горных районах Восточной Сибири // Труды II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Вып. I / под ред. В.Г. Ткачук. Иркутск, 1959. С. 71–84.
23. Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // Сибирский лесной журнал. 2015. № 1. С. 58–73.
24. Dammon A.W.H., French T.W. The ecology of peat bogs of the glaciated northeastern United States // Biological Report 85 (7.16). Supt. of Documents. U.S. Fish and Wildlife Service. Washington DC, 1987. 100 p.
25. Pfadenhauer J. Tropische und subtropische Moore // Moor- und Torfkunde. Auflage 3. E. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), 1990. PP. 102–113.
26. Peatlands of the Western Guayana Highlands, Venezuela / ed. by Zinck J.A., Huber O. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. 295 p.

27. Investment-analysis.ru. URL: <http://investment-analysis.ru/metodFC2/daily-variance-arithmetic-mean-deviation.html>
28. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.
29. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и почвенном растворе. Изд. 2-е, испр. и доп. Тула: Гриф и К, 2012. 124 с.
30. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Природа кислотных свойств подстилки болотных березняков // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2013. № 2. С. 205–219.
31. Шамрикова Е.В., Денева С.В., Кубик О.С., Пунегов В.В., Кызырова Е.В., Боброва Ю.И., Зуева О.М. Кислотность органогенных горизонтов арктических почв побережья Баренцева моря // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1325–1336. doi: [10.1134/S1064229317110102](https://doi.org/10.1134/S1064229317110102)
32. Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В., Бабаева И.В., Михайлов Б.А. Эконометрика. М.: Финансы и статистика, 2003. 344 с.
33. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 768 с.

*Поступила в редакцию 25.12.2017 г.; повторно 12.02.2018 г.;
принята 10.03.2018 г.; опубликована 30.03.2018 г.*

Авторский коллектив:

Ефремова Тамара Тимофеевна – д-р биол. наук, в.н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН – Обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/28).

E-mail: eft2@ksc.krasn.ru

Ефремов Станислав Петрович – д-р биол. наук, проф., гл.н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН – Обособленно-го подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/28).

E-mail: eft2@ksc.krasn.ru

Мелентьева Надежда Васильевна – м.н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН – Обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/28).

E-mail: avrova@ksc.krasn.ru

Аврова Ада Фёдоровна – канд. биол. наук, н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН – Обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/28).

E-mail: avrova@ksc.krasn.ru

For citation: Efremova TT, Efremov SP, Melent'eva NV, Avrova AF. Altitudinal differentiation of acid-base properties of the river valley peat soils in the Kuznetsk Alatau. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;41:135-155. doi: [10.17223/19988591/41/8](https://doi.org/10.17223/19988591/41/8) In Russian, English Summary

Tamara T. Efremova, Stanislav P. Efremov, Nadejda V. Melent'eva, Ada F. Avrova

VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center SB RAS", Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Altitudinal differentiation of acid-base properties
of the river valley peat soils in the Kuznetsk Alatau**

In the complex structure of the vertical altitudinal zonality of the Altai-Sayan mountain country, peat soils were almost not represented. The aim of this research was to develop a topographic series of peat soils of the Kuznetsk Alatau. The studied peatlands were confined to the basins of the Belyi Iyus and the Chernyi Iyus rivers and

located at different hypsometric levels of the relief on the Eastern slope of the Kuznetsk Alatau, at 1543, 1087, 832, 622, 579 and 547m above sea level (See Fig. 1). As a criterion of vertical structural organization of soil, we used acid-base properties: water pH (water extract), salt pH (extract of 1M KCl) and general potential - nonexchangeable acidity (extract of 1M CH₃COONa). The determined value of acidity was multiplied by an empirical coefficient 1.75. The sum of exchangeable cations (by Kappen-Hilkovits) was found in the extract of 0.1M HCl, in which the Ca²⁺+Mg²⁺ was determined by complexometric titration. According to the difference between the sum of exchangeable cations and Ca²⁺+Mg²⁺, we identified the content of other (unidentified) cations. The degree of soil saturation with bases, expressed in %, was calculated as the proportion of exchangeable bases in 0.1M HCl solution to the sum (exchangeable bases + nonexchangeable acidity).

The V-diagrams, constructed on the basis of water pH, salt pH and saturation of soil absorbing complex (SAC) with exchangeable calcium and magnesium, describe the acidic trace of soil formation and simulate the acidification of top soil horizons in the course of peat genesis (See Fig. 2). High-precision regression model was proposed for the prediction of exchangeable acidity value (pH_{KCl}) by the value of active acidity (pH_{H₂O}). Using the methods of multivariate statistical analysis (discriminant, multidimensional scaling), we grouped peat soils into three clusters with acid-base characteristics. The parameter of SAC saturation by alkaline-earth cations and pH salt value makes the dominant contribution to the organization of peat soil clusters with a final prediction 89% (See Table 3, Fig. 4). In the structure of vertical soil zones of the Altai-Sayan mountain country, particularly of the Eastern slopes of the Kuznetsk Alatau, the geochemical associations (clusters) of peat soils were identified: a) acidic and unsaturated by calcium and magnesium (<30-50%) on the whole profile within the boundaries of alpine tundra and subalpine complexes at the altitude of 1500-1100 m; b) slightly acidic and slightly saturated with bases (50-70%) within the mountain-taiga zone of dark coniferous forests 1100-800 m a.s.; c) neutral and moderately saturated with alkaline-earth base (70-90%) associations of peat soils within the zone of subtaiga-forest-steppe 800-500 m a.s. (See Table 4). Chorological organization of peat soils is in accordance with the hydrochemical zoning of underground waters and high-zone structure of the vegetation cover at automorphic sites. However, in the forest zone of wetlands of the Kuznetsk Alatau eastern slope, regardless of acid-base properties of peat soils, spruce forests mainly form, reflecting the main characteristics of soil hydromorphism. In this regard, the status of indigenous groups of swamp spruce forests can be considered as sufficient objective criteria of a regional climate change towards dryness.

The paper contains 5 Figures, 5 Tables and 33 References.

Key words: mountain peatlands; water pH; salt pH; nonexchangeable acidity; saturation with bases; buffering; geochemical association; multivariate statistical analysis

References

1. P'yavchenko NI. K izucheniyu bolot Krasnoyarskogo kraya [On studying wetlands of Krasnoyarsk kray]. In: *Zabolochennyye lesa i bolota Sibiri* [Paludificated forests and swamps of Siberia]. Moscow: AN SSSR Publ.; 1963. pp. 5-32. In Russian
2. Semenov VA. Vodnye resursy [Water resources]. In: *Izmenenie klimata i ego vozdeystvie na ekosistemy, naselenie i khozyaystvo rossiyskoy chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona: otsenochnyy doklad* [Climate change and its impact on ecosystems, population and economy

- of the Russian portion of the Altai-Sayan Ecoregion: Evaluation Report]. Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF Russia). Kokorin AO, editor. Moscow, 2011. pp. 52-72. In Russian
3. Muldiyarov EYa, Lapshina ED. K izucheniyu bolot Kuznetskogo Alatau [On studying wetlands of the Kuznetsk Alatau]. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal = Contemporary Journal of Ecology*. 2000;5:645-652. In Russian
 4. Il'inyh NI. Pochvy Kuznetskogo Alatau [Soils of the Kuznetsk Alatau]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskoe knizhnoe Publ.; 1970. 166 p. In Russian
 5. Smirnov MP. Pochvy Zapadnogo Sayana [Soils of the Western Sayan]. Moscow: Nauka Publ.; 1970. 236 p. In Russian
 6. Volkova II, Baikov KS, Syso AI. Kuznetsk Alatau mires as filters for natural waters. *Contemporary Problems of Ecology*. 2010;3(3):265-271. doi: [10.1134/S1995425510030021](https://doi.org/10.1134/S1995425510030021)
 7. Platonov GM. Bolota lesostepi Sredney Sibiri [Forest-steppe zone wetlands of Middle Siberia]. Moscow: Nauka Publ.; 1964. 116 p. In Russian
 8. Efremov SP. Bolota zony KATEKa v svyazi s perspektivami ih hozyaystvennogo ispol'zovaniya i ohrany [Swamps of KATEK region in connection with the prospects of their economic use and protection]. In: *Pochvy zony KATEKa* [Soils of KATEK region]. Korsunov VM, Shugaley LS, editors. Krasnoyarsk: ILiD SO AN SSSR Publ.; 1981. pp. 41-56. In Russian
 9. Efremova TT. Nekotorye voprosy hozyaystvennogo osvoeniya osushennykh bolot [Some questions of economic development of drained wetlands]. In: *Pochvy zony KATEKa* [Soils of KATEK region]. Korsunov VM and Shugaley LS, editors. Krasnoyarsk: ILiD SO AN SSSR Publ.; 1981. pp. 56-65. In Russian
 10. Kulizhskiy SP. Effective way of use of nature protection territories. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2008;1:42-56. In Russian
 11. P'yavchenko NI, Kornilova LI. O diagnosticheskikh pokazatelyakh tipov torfa [On diagnostic indicators of peat types]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1978;10:146-153. In Russian
 12. Morozova RM. K voprosu o klassifikatsii bolotnykh osushennykh pochv [On classification of swamp drained soils]. In: *Izmenenie lesobolotnykh biogeotsenozah pod vliyaniem osusheniya* [The change in swamp biocenoses under the influence of drainage]. Kozlovskaya LS and Medvedeva VM, editors. Petrozavodsk: KF AN SSSR Publ.; 1986. pp. 108-124. In Russian
 13. Glazovskaya MA. Pochvy mira [World soils]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1972. 231 p. In Russian
 14. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Vypusk 21. Kniga 2. Krasnoyarskiy kray, Tuvinskaya ASSR [Scientific applied handbook on the USSR climate. Iss. 21. Book 2. Krasnoyarsk kray, Tuva ASSR]. Smirnova NS, editor. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1990. 408 p. In Russian
 15. Arinushkina EV. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Guid to chemical analysis of soils]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1970. 487 p. In Russian
 16. *Klassifikatsiya pochv Rossii* [Soil classification of Russia]. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, editors. Moscow: Pochvennyy institut im. VV Dokuchaeva RASKhN Publ.; 2000. 235 p. In Russian
 17. P'yavchenko NI. Stepen' razlozheniya torfa i metody ee opredeleniya [Decomposition degree of peat and methods of its determination]. Krasnoyarsk: ILiD SO AN SSSR Publ.; 1963. 56 p. In Russian
 18. Halafyan AA. STATISTICA 6. Statisticheskyy analiz dannykh [Statistical analysis of data]. 3rd ed. Moscow: OOO "Binom-Press" Publ.; 2007. 515 p. In Russian
 19. Kokotov YA, Suhacheva EY, Aparin BF. Acidity field of soils as ion-exchange systems and diagnostics of genetic soil horizons. *Eurasian Soil Science*. 2014;12:1227-1237. doi: [10.1134/S1064229314120072](https://doi.org/10.1134/S1064229314120072)

20. Kokotov YA, Suhacheva EY, Aparin BF. Analysis of the indices of acidity in the soil profile and their relationship with pedogenesis. *Eurasian Soil Science*. 2016;1:1-7. doi: [10.1134/S1064229316010087](https://doi.org/10.1134/S1064229316010087)
21. Stepanov VM. Hidrogeologicheskaya zonal'nost' v gornykh rayonakh Vostochnoy Sibiri [Hydrogeological zonality in the mountainous regions of Eastern Siberia]. In: *Trudy II soveshchaniya po podzemnym vodam i inzhenernoy geologii Vostochnoy Sibiri*. Vypusk I [Proceedings of the II meeting on groundwater and engineering geology of Eastern Siberia. Iss. I]. Tkachuk VG, editor. Irkutsk. 1959. pp. 71-84. In Russian
22. Bocharnikov MV, Ismailova DM. Vertical altitudinal zonality of vegetation cover on the eastern slopes of the Kuznetsk Alatau Range. *Moscow University Geography Sciences Bulletin*. 2011;6:76-84.
23. Efremova TT, Avrova AF, Efremov SP. Morphogenetic litter types of bog spruce forests. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2015;1:58-73. In Russian
24. Dammon AWH, French TW. The ecology of peat bogs of the glaciated northeastern United States. Biological Report 85 (7.16). Supt. of Documents. U.S. Fish and Wildlife Service. Washington DC, 1987. 100 p.
25. Pfadenhauer J. Tropische und subtropische Moore. In: *Moor- und Torfkunde*. Auflage 3. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), 1990. pp. 102-113. In German
26. Peatlands of the Western Guayana Highlands, Venezuela. Zinck JA, Huber O, editors. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 295 p.
27. Sait "Investment-analysis.ru". Available at: <http://investment-analysis.ru/metodFC2/daily-variance-arithmetic-mean-deviation.html> (assess 25.12.2017)
28. Orlov DS, Sadovnikova LK, Suhanova NI. Himiya pochv [Soil chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2005. 558 p. In Russian
29. Sokolova TA, Tolpeshta II, Trofimov SYa. Pochvennaya kislotnost'. Kislотно-osnovnaya bufernost' pochv. Soedineniya alyuminiya v tverdoy faze pochvy i pochvennom rastvore [Soil acidity. Acid-base buffering of soils. Aluminium compounds in the solid phase and solution of soil]. 2nd ed. Tula: Grif i K Publ.; 2012. 124 p. In Russian
30. Efremova TT, Efremov SP. Nature of acidic properties of litter in bog birch forests. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2013;2:205-219. In Russian
31. Shamrikova EV, Deneva SV, Kubik OS, Punegov VV, Kyz'yurova EV, Bobrova Yul, Zueva OM. Acidity in organic horizons of arctic soils on the Barents Sea coast. *Eurasian Soil Science*. 2017;11:1283-1293. doi: [10.1134/S1064229317110102](https://doi.org/10.1134/S1064229317110102)
32. Eliseeva II, Kuryshva SV, Kosteeva TV, Babaeva IV, Mihaylov BA. Ekonometrika [Econometrics]. Moscow: Finansy i statistika Publ.; 2003. 344 p. In Russian
33. Perel'man AI, Kasimov NS. Geohimiya landshafta [Landscape geochemistry]. Moscow: Astreya Publ.; 1999. 768 p. In Russian

Received 25 December 2017; Revised 21 February 2018;

Accepted 10 March 2018; Published 30 March 2018

Author info:

Efremova Tamara T, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center SB RAS", Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50 Akademgorodok, bld. 28, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Efremov Stanislav P, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Principal Researcher, Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of

Sciences, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50 Akademgorodok, bld. 28, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Melent'eva Nadejda V, Junior Researcher, Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies, VN Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50 Akademgorodok, bld.28, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: avrova@ksc.krasn.ru

Avrova Ada F, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50 Akademgorodok, bld. 28, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: avrova@ksc.krasn.ru