

УДК 631.417.2;631.445.12

## ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГУМУСНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ НА УРОВНЕ ВЫСОТНЫХ ПОЯСОВ

© 2019 г. Т. Т. Ефремова<sup>1</sup>, \*, С. П. Ефремов<sup>1</sup>, Н. В. Мелентьева<sup>1</sup>, А. Ф. Аврова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

\*e-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 25.09.2018 г.

После доработки 20.12.2018 г.

Принята к публикации 15.02.2019 г.

Исследован качественный и количественный состав органического вещества горных торфяных почв криогенных олиготрофных (Hyperdystric Cryic Histosols), олиго-мезотрофных (Orthodystric Histosols), мезо-эутрофных (Oligoeutric Histosols) и эутрофных (Hypereutric Histosols) восточного макросклона Кузнецкого Алатау (республика Хакасия). Изучена высотно-поясная дифференциация и выполнена объективная группировка (кластеризация) торфяных почв по гумусному состоянию, установлены наиболее информативные признаки сходства и/или различия кластеров. Проведены последовательный анализ группового состава органического вещества методом кислотной и щелочной экстракции, оценка по системе показателей гумусного состояния почв, многомерный статистический анализ (кластерный, дискриминантный, канонический). Значимые для дискриминации показатели состояния органического вещества формируют две дискриминантные функции. Первая обладает наибольшими дискриминирующими возможностями различать кластеры (80%) и включает показатели, которые характеризуют глубину преобразования торфяных почв: степень гумификации ( $\Sigma\text{ГК} + \Sigma\text{ФК}$ ), тип гумуса (отношение  $\text{C}_{\text{ГК}}/\text{C}_{\text{ФК}}$ ), соотношение фракций гумусовых веществ ( $\text{C}_{0.02 \text{ н NaOH}}/\text{C}_{0.1 \text{ н NaOH}}$ ). Функцией 1 дискриминируются кластеры торфяных почв высокогорья: мерзлотные олиготрофные альпийско-тундрового пояса (1460 м над ур. м.) и олиго-мезотрофные субальпийского пояса (1087 м). Вторая дискриминантная функция обеспечивает меньшую долю различия (16%) и включает показатели исходного состояния растений-торфообразователей: гемиллелюлозы и целлюлоза. Функцией 2 дискриминируются кластеры торфяных почв лесного пояса: мезоэутрофные горно-таежного пояса (832 м) и эутрофные подтаежно-лесостепного пояса (622–573 м над ур. м.). Гумусное состояние горных торфяных почв соответствует их диагностике по принципу насыщенности основаниями и величине pH, а также отражает общие признаки горного почвообразования – увеличение гумусированности с высотой, установленной ранее для почв минерального ряда.

**Ключевые слова:** горные торфяные почвы, органическое вещество, диагностика, формализованная классификация, многомерный статистический анализ

DOI: 10.1134/S0032180X19080070

### ВВЕДЕНИЕ

Географические закономерности изменения содержания и состава гумусовых веществ в почвах разных биоклиматических зон относятся к числу приоритетных научных проблем. Торфяные болота обширной Алтае-Саянской горной страны, равно как и других природных зон планеты, изучены слабее равнинных территорий [4, 30, 40]. Большая часть сведений о горных болотах юга Сибири касается, главным образом, топологических и экологических закономерностей размещения растительного покрова [3, 15, 24, 25]. Значительно меньше информации находим по характеристике горных торфяных почв, что отмечается и другими авторами [17, 42]. Болотные почвы на уровне типа

включены в систематический список почв высокогорной и бореально-лесной областей Западного Саяна и Кузнецкого Алатау [10, 26]. Однако описание их схематично и ограничивается некоторыми физико-химическими показателями верхних 5(10) см торфа. Подробнее исследованы торфяные почвы предгорий Западного Саяна. Изучены агрохимические свойства, выполнено районирование болот, даны рекомендации по их хозяйственному освоению [5, 12, 19], показана специфика биохимических и окислительно-восстановительных процессов в осушенных почвах [6]. В текущее время выполнена объективная группировка долинных торфяных почв восточного макросклона Кузнецкого Алатау по кислот-

но-основным показателям, отражающая высотнo-поясные закономерности их формирования [9]. Проведена оценка влияния промышленных выбросов Кузбасса на экологическое состояние болот западного макросклона Кузнецкого Алатау [4].

Наименее представленной остается информационная база параметров, состава и свойств органического вещества болот не только Алтае-Саянской горной страны, но и других природных зон [44]. Между тем торфяные почвы играют большую роль в аккумуляции углекислого газа и формировании углеродного пула планеты, который складывается из территориальных балансов [11], а судьба огромных запасов углерода в торфяных болотах вызывает озабоченность ученых всего мира в связи с проблемой глобального изменения климата [34, 36, 38]. В этом аспекте для горных болот предложена регрессионная модель прогноза содержания углерода по зольности торфа с точностью аппроксимации 5–7% [8] и в связи с потерями при прокаливании, точность аппроксимации 17.8% [30]. В контексте климатических изменений текущих десятилетий показаны темпы накопления углерода на единицу площади ( $m^2$ ), рассчитаны средние запасы за последние 200 лет и учтены изменения площадей торфяников в горах Южного Алтая на территории Китая [30, 40], охарактеризованы также криогенные и продукционные процессы мерзлых бугристых болот высокогорий Алтая [4]. Изучен групповой и фракционный состав органического вещества моховых подстилок болотных ельников Кузнецкого Алатау [37]. Приводятся сведения о маркерах в составе неспецифических органических веществ, на основе которых реконструируются биоклиматические условия среды начальной стадии торфогенеза и оценивается устойчивость торфяных болот к климатическим изменениям [17, 32, 41]. Вместе с тем сохранение торфяных отложений от деградации обеспечивается преимущественно системой гумусовых веществ – биотермодинамически устойчивых продуктов трансформации в завершающем звене многообразной и непрерывной цепи превращений растительных остатков в природной обстановке [18]. Поэтому оценка гумусного состояния горных торфяных болот важна с позиции глобальных климатических изменений, которые будут оказывать неодинаковое влияние на разложение стабилизированного органического вещества и степень обратимости этих изменений в различных природных зонах.

Не менее важна экологическая функция гумусовых веществ в формировании плодородия горных торфяных болот, которые рассматриваются, в том числе как экологические архивы атмосферных осадочных микроэлементов и загрязнителей [31]. Гумусовые вещества содействуют также поиску рудных месторождений торфогеохимическим методом, играя активную роль в связывании

труднорастворимых гуматов меди, цинка, свинца железа, марганца, ванадия и других металлов [28].

Цель работы – оценить гумусное состояние и выявить высотнo-поясную дифференциацию состава органического вещества горных торфяных почв Кузнецкого Алатау по особенностям залегания в рельефе. Задачи: изучить групповой и фракционный состав органического вещества торфяных почв, сформированных на различных гипсометрических ступенях рельефа, выполнить объективную группировку (дискриминацию) почв по составу органического вещества методами многомерного статистического анализа, выявить наиболее информативные признаки гумусного состояния, диагностирующие сходство и/или различие кластеров торфяных почв.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследований относится к бассейнам рек Белый Июс и Черный Июс восточного макросклона Кузнецкого Алатау, который является частью Алтае-Саянской горной страны (республика Хакасия). Климат – резко континентальный с холодной зимой и жарким летом. Увлажнение избыточное: коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову – 1.75–2.4 [16].

Горные торфяные массивы, расположенные на различных гипсометрических ступенях рельефа, питаются атмосферными осадками, склоновыми и надмерзлотными водами, а также подземными водами. Разгрузка вод происходит обычно по горным склонам и речным долинам, которые, как правило, заболочены.

**Высокогорная ступень** начинается превышением поверхности 1100 м над ур. м. На привершинных и боковых гребнях высокогорий формируются снежники, которые обычно находятся в эрозионных врезках на карнизах, уступах, карах и у подножий склонов, которые заняты торфяными болотами с горизонтами сезонной мерзлоты и мерзлотных перелеток. В напочвенном покрове болот доминируют представители родов *Sphagnum*, *Tomenthypnum*, *Aulacomnium*, *Helodium*, *Calliergon*, *Polytrichum*, *Dicranum*, *Tuidium*, *Funaria*, *Bryum*. Проективное покрытие мхами достигает обычно 85–100%.

Торфяной массив Арарат (рис. 1) относится к склоново-каровым геоморфологическим типам болот. Он залегает на склоне горы Столовая (абсолютная высота 1460 м) в естественном чашеобразном углублении (кресловине) с многолетним снежником. Общая площадь торфяника 1.8 га. 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 высоте 1087 м и

относится к геоморфологическому типу болот речных долин: 54°05'17" N, 89°05'49" E.

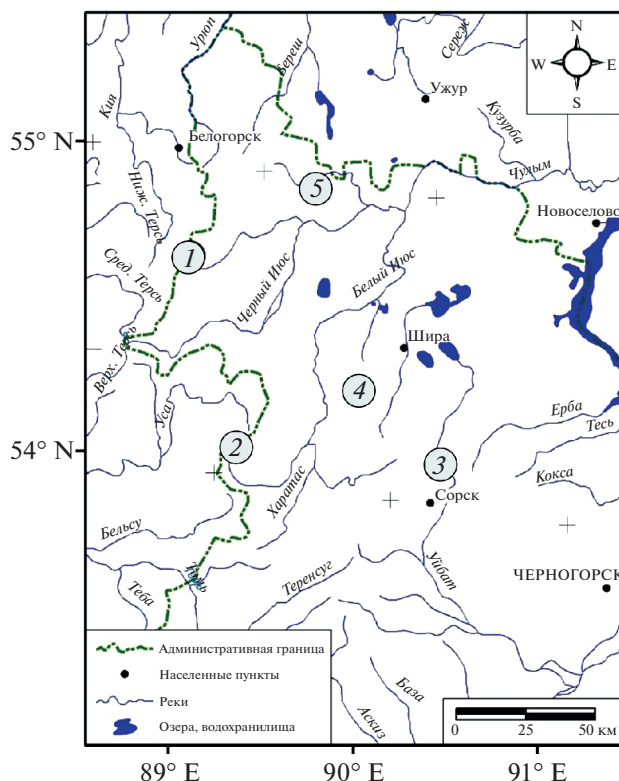
**Плоскогорье** – гипсометрическая ступень рельефа 400–800 м над ур. м. В лесном поясе доминируют геоморфологические типы болот речных долин. Торфяные массивы чаще всего заняты хвойными и хвойно-лиственными древостоями с преобладанием ели сибирской гипново-зеленомошной группы типов леса. В напочвенном покрове господствуют мхи родов *Tomenthypnum*, *Aulacomnium*, *Helodium*, *Drepanocladus*, *Calliergon*, *Pleurozium*, *Polytrichum*, *Hylocomium*, *Dicranum*, *Rhytidiadelphus*, *Tuidium*, *Brium*, *Ptilium*.

Торфяной массив Бюра (0.65 тыс. га) залегает в заболоченной долине р. Бюра на абсолютной высоте 832 м Батеневского кряжа. Географические координаты отбора образцов: 54°07'41" N, 90°15'31" E. Массив Тунгузюль (1.77 тыс. га) сформирован на высоте 622 м в долине р. Тунгузюль: 54°16'32" N, 89°39'02" E. Торфяной массив Печище (0.62 тыс. га) расположен на высоте 573 м Солгонского кряжа в долине р. Печище: 54°57'54" N, 89°18'08" E.

Исследована современная почва – корнена-сыщенная зона торфяной залежи 0–30(40) см, которая ограничивалась, в том числе наличием в профиле мерзлотных горизонтов. Для отбора образцов почв вырезали торфяные монолиты размером 25 × 25 × 30(40) см и подразделяли на генетические горизонты, как правило, не менее 3–4. На каждом из пяти объектов отобрали по 4 монолита сообразно доминирующим растительным ассоциациям. По ходу химического анализа в каждой из 9 полученных вытяжек исследовали по две пробы. Затем рассчитывали показатели гумусного состояния. В итоге получено более 650 результатов, характеризующих состояние органического вещества, которые обработаны методами многомерного статистического анализа.

Групповой и фракционный состав органического вещества торфяных почв, а также определение  $S_{орг}$  выполняли по полной методике Пономаревой и Николаевой [20]. Азот – по методу Кьельдаля. Зольность – прокаливанием навески в муфельной печи при температуре 800°C, сумму обменных оснований – по Каппену–Гильковицу в вытяжке 0.1 н HCl, оценка реакции среды – по величине  $pH_{H_2O}$  [1]. Степень разложения сухого торфа определяли объемно-весовым методом [21]. Многомерный статистический анализ проводили в программе Statistica 6 по руководству [29]. Классификацию торфяных почв выполняли по принципу насыщенности основаниями и величине pH [14, 22], на роды и виды почв – по составу торфообразователей и степени разложения [27].

Выделенные типы и подтипы горных торфяных почв по кислотно-основным показателям со-



**Рис. 1.** Карта-схема местонахождения исследуемых торфяных массивов восточного макросклона Кузнецкого Алатау: 1 – Арарат, 2 – Пихтерек, 3 – Бюра, 4 – Тунгузюль, 5 – Печище.

ответствуют высотно-поясной структуре растительного покрова восточного макросклона Кузнецкого Алатау [9], которая показана в работе [3]. Современные торфяные почвы мощностью 32 см массива Арарат с многолетним снежником (высокогорный альпийско-тундровый пояс 1350–1500 м) – кислые, сильноненасыщенные основаниями (рис. 2А, 2Б) отнесены к типу криогенных олиготрофных и соответствуют *Hyperdystric Cryic Histosols* [13]. Современные торфяные почвы мощностью 27 см массива Пихтерек (субальпийский пояс 1100–1350 м) – кислые, ненасыщенные основаниями классифицированы как подтип олиго-мезотрофных *Orthodystric Histosols*. Современные торфяные почвы мощностью 29 см массива Бюра (горно-таежный пояс 800–1100 м) – слабокислые, слабонасыщенные основаниями отнесены к мезо-эутрофные подтипу *Oligeoecetric Histosols*. Современные торфяные почвы мощностью 29–30 см массивов Тунгузюль и Печище (подтаежно-лесостепной пояс 500–800 м) – нейтральные и слабощелочные, умереннонасыщенные основаниями идентифицированы как эутрофный тип *Hypereutric Histosols*. Все почвы слагаются торфами моховой группы. Как следует из рис. 2В, по степени разложения (<25%) верхние горизонты

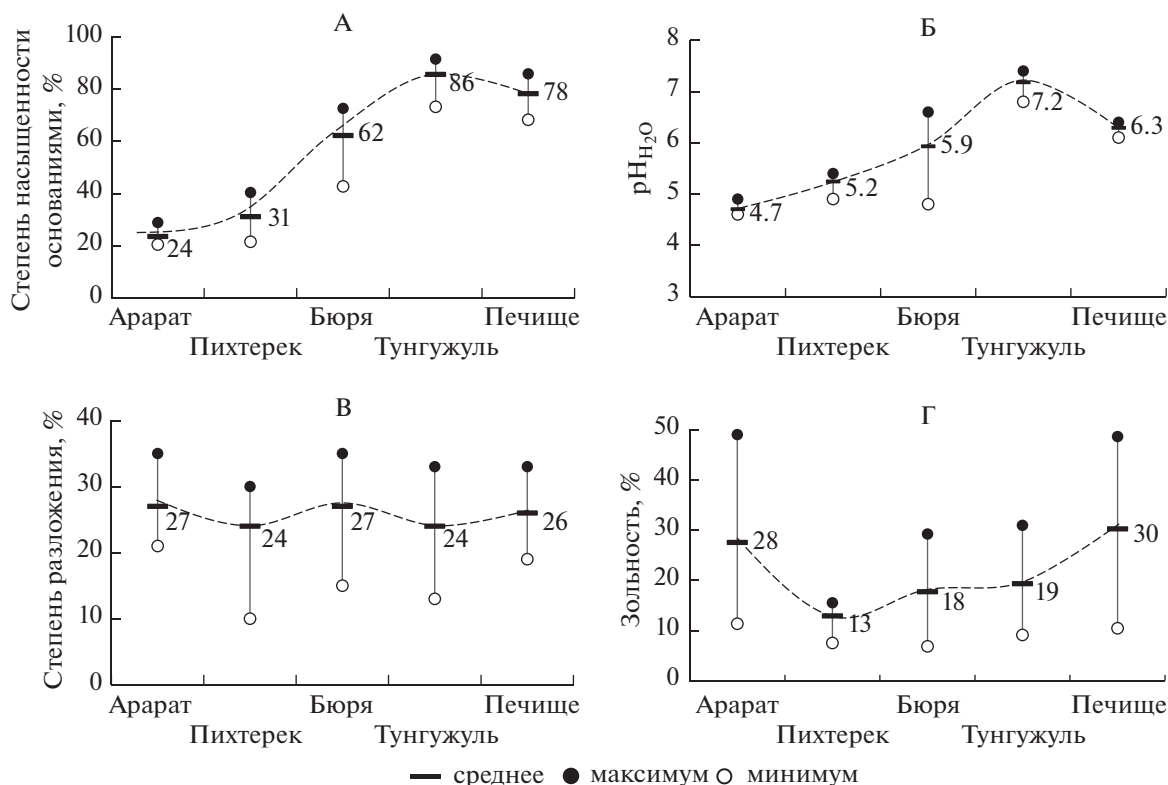


Рис. 2. Физико-химические показатели горных торфяных почв: А – насыщенность основаниями, Б – рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, В – степень разложения, Г – зольность.

почв 0–5(12) см отнесены к торфяным видам, нижежащие (25–45%) – к перегнойно-торфяным. Зольность горных торфяников в основном больше конституционной (12%), то есть высокая (рис. 2Г). В мерзлотных условиях это результат доминирующего криогенного выветривания кристаллических пород [28]. Для торфяников речных долин большое значение имеют высотные градиенты залегания, а также привнос минеральных веществ паводковыми и склоновыми водами.

Несмотря на разнообразие условий природной среды, профиль горных торфяных почв характеризуется общими чертами – повышением с глубиной физико-химических показателей и ацидофикацией верхних горизонтов (зоны торфогенеза).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современных торфяных почвах (0–30 см), сформированных на различных высотах Кузнецкого Алатау, содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) варьирует в пределах 22.9–49.5% и отражает среднюю изменчивость признака (коэффициент вариации  $C_v$  16%). Такие данные сопоставимы с количеством  $C_{орг}$  в горных торфяниках Бразилии 20.8–43.3% [45] и несколько ниже, чем в аналогичных почвах горных территорий Франции –

42.4–50.0% [35]. Отношение C/N находится в пределах 17–40 ( $C_v$  23%) и сопоставимо с насыщенностью органического углерода азотом горных торфяных почв центральной части Тайваня [33]. Количество гемицеллюлоз варьирует в пределах 4.5–11.7% ( $C_v$  27%). В соответствии с представлениями об информативности коэффициентов вариации [23], горные торфяные почвы можно характеризовать как однородную совокупность с умеренно высокой вариацией ( $C_v < 33\%$ ) по содержанию углерода, гемицеллюлоз и величине C/N. Степень гумификации почв ( $\Sigma ГК + \Sigma ФК$ ) изменяется от слабой до сильной – 22–78% (оценка по [7]) и характеризуется высокой изменчивостью ( $C_v$  39%). Отношение  $C_{ГК}/C_{ФК}$  0.6–3.1 отражает варьирование типа гумуса от фульватного до чисто гуматного ( $C_v$  56%). Количество целлюлоз изменяется от 2.6 до 11.1% ( $C_v$  42%). Такие показатели коэффициентов вариации гумусного состояния торфяных почв формируют неоднородные совокупности ( $C_v = 34–100\%$ ).

При использовании системы показателей, включающей фракционный состав гумусовых кислот, торфяные массивы восточного макросклона Кузнецкого Алатау не удалось организовать в наглядные структуры (классы) методом древовидной кластеризации. При исключении

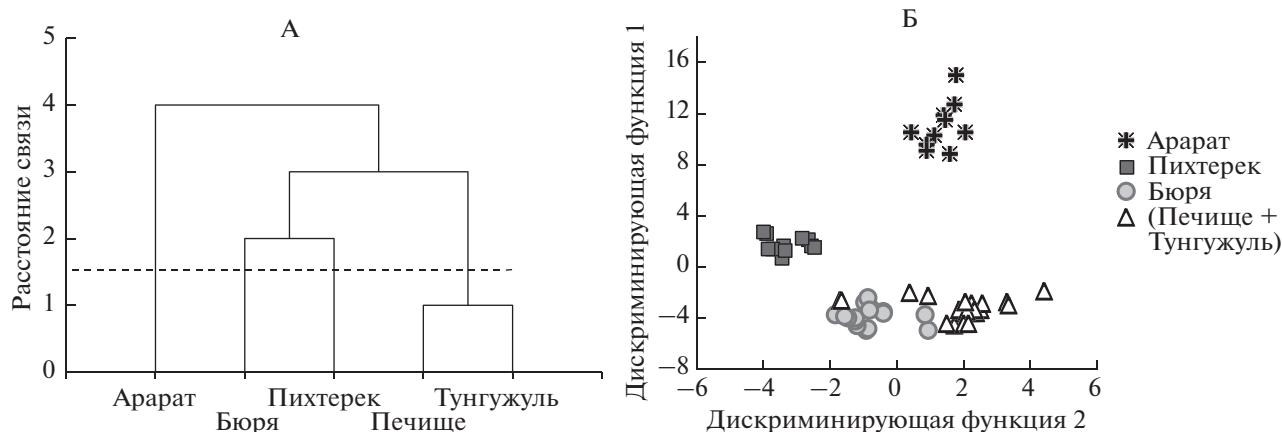


Рис. 3. Кластеризация торфяных массивов по состоянию органического вещества (А) и размещение сгруппированных объектов в координатах двух канонических дискриминантных функций (Б).

этих данных объединение в однородные группы стало возможным, благодаря совокупному применению следующих показателей: насыщенность органического вещества азотом (отношение C/N), степень гумификации ( $\Sigma ГК + \Sigma ФК$ ), тип гумуса ( $C_{ГК}/C_{ФК}$ ), соотношение фракций гумусовых веществ ( $C_{0.02 \text{ n NaOH}}/C_{0.1 \text{ n NaOH}}$ ), содержание гемицеллюлоз и целлюлозы (рис. 3А). На дендрограмме хорошо видно, что организовалось четыре кластера. Более всего отличается от остальных торфяной массив Арарат (чем выше уровень агрегации, тем меньше сходство с членами соответствующей совокупности). Объекты Бюря и Пихтерек также можно классифицировать как самостоятельные кластеры, так как между ними существует достаточно большое расстояние. Объединились массивы Тунгжуль и Печище, 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. 1). Состав органического вещества торфяных массивов Пихтерек и Арарат характеризуется 100% попаданием в соответствующую группу, доля корректно классифицированных наблюдений в кластерах Бюря и (Тунгжуль + Печище) составляет 88 и 90% соответственно. Далее оценили персональный вклад каждой переменной в дискриминацию (разделение) сгруппированных торфяных почв (табл. 2). Согласно  $\lambda$ -Уилкса, лежащей около 0, и *F*-критерию, все показатели способны значимо различать кластеры.

Для нахождения взаимосвязи между наборами переменных использовали канонический корреляционный анализ, с помощью которого находят зависимость между взвешенными суммами переменных из каждого множества. Взвешенные суммы определяют канонический корень – кано-

Таблица 1. Оценка методом дискриминантного анализа межгрупповой дисперсии кластеров торфяных массивов Кузнецкого Алатау

Кластеры торфяных почв*	Квадраты расстояний Махаланобиса								
	<i>p</i> -уровень значимости различий				Матрица классификации				
	1	2	3	(4 + 5)	% попадания	1	2	3	(4 + 5)
1		118	236	210	100	10	0	0	0
2	<0.001		43	52	100	0	12	0	0
3	<0.001	<0.001		12	88	0	0	14	2
(4 + 5)	<0.001	<0.001	<0.001		90	0	0	2	19
						Итоги классификации			
					93	10	12	16	21

\* Кластеры почв торфяных массивов: 1 – Арарат, 2 – Пихтерек, 3 – Бюря, (4 + 5) – Тунгжуль + Печище.

**Таблица 2.** Оценка вклада показателей гумусного состояния в дискриминацию горных торфяных почв

Параметр	$\lambda$ -Уилкса	$\lambda$ -Уилкса частная	F-критерий	p-уровень	Толерантность, T	$R^2(1 - T)$
C/N	0.007	0.597	11.24	<0.001	0.27	0.73
( $\Sigma$ ГК + $\Sigma$ ФК)	0.012	0.386	26.52	<0.001	0.31	0.69
$C_{ГК}/C_{ФК}$	0.016	0.282	42.42	<0.001	0.42	0.58
$C_{0.02 \text{ н NaOH}}/C_{0.1 \text{ н NaOH}}$	0.008	0.530	14.81	<0.001	0.57	0.43
Гемицеллюлозы	0.011	0.417	23.26	<0.001	0.43	0.57
Целлюлоза	0.008	0.540	14.18	<0.001	0.49	0.51

**Таблица 3.** Собственные значения канонических дискриминантных функций и их статистическая значимость

Дискриминантная функция	Собственное значение	Каноническая корреляция, R	$\lambda$ -Уилкса	$\chi^2$ -критерий	p-уровень
0	20.63	0.98	0.004	286.8	<0.001
1	4.20	0.90	0.097	123.9	<0.001
2	0.99	0.71	0.502	36.6	<0.001

ническую дискриминантную функцию (каноническую переменную) как некую “скрытую” переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных. Максимальное число оцениваемых корней равно числу переменных наименьшего подмножества минус единица. В нашем случае число переменных равно 6, а кластеров 4, поэтому оцениваются три канонических корня.

О реальной полезности канонических корней в дискриминации кластеров торфяных почв говорит величина и значимость  $\chi^2$ -критерия (табл. 3). Первая строка таблицы показывает значимость критерия для всех корней в целом, вторая — значимость для оставшихся корней после удаления первого корня и т. д. Как видим, все канонические корни являются значимыми (p-уровень <0.001). Наиболее тесная связь кластеров почв обнаружена с первым и вторым каноническими корнями ( $R = 0.90-0.98$ ). О лучшем разграничении кластеров торфяных почв по корню 1 и 2 свидетельствует также статистика  $\lambda$ -Уилкса. Являясь обратной мерой, приближающееся к нулю значение  $\lambda$ -Уилкса, характеризует высокую степень различий между кластерами по показателям гумусного состояния.

Согласно стандартизованным коэффициентам каждой из переменных (табл. 4), наибольший совокупный вклад, или вес в значение дискриминантной функции (корня) 1 вносят показатели ( $\Sigma$ ГК +  $\Sigma$ ФК),  $C_{ГК}/C_{ФК}$ ,  $C_{0.02 \text{ н NaOH}}/C_{0.1 \text{ н NaOH}}$ , C/N, которые характеризуют гумификацию, то есть глубину преобразования растительного материала. В дискриминантную функцию 2 наибольший вклад вносят гемицеллюлозы и целлюлоза —

компоненты исходного состояния органической субстанции. Дискриминирующую возможность (мощность) выделенных корней можно выразить в процентах (доля собственного значения корня от суммы всех собственных значений). Первая функция обладает наибольшими дискриминирующими возможностями различать кластеры (80%), вторая обеспечивает меньшую долю различия (16%), дискриминирующая сила третьей значительно ниже (4%), то есть она не добавляет новой (существенной) информации для объяснения различий между кластерами.

Таким образом, значимые для дискриминации горных массивов переменные характеризуют две составные части органического вещества торфа — сохранность исходного растительного материала и степень биохимического преобразования — гумусное состояние почв.

Диаграмма рассеяния в координатах первых двух корней значений нестандартизованных канонических коэффициентов каждого наблюдения позволяет определить кластеры, лучше всего идентифицируемые конкретной канонической функцией. Наблюдения, принадлежащие конкретному кластеру, локализуются в определенных областях плоскости. При этом расстояния между центроидами тем больше, чем больше различие между кластерами. Так, высокогорные болота явно дискриминируются функцией (корнем) 1, характеризующей гумусное состояние торфяных почв (рис. 3Б). Наиболее отчетливо (среднее значение дискриминантной функции +11.0) обособляются криогенные олиготрофные почвы альпийско-тундрового пояса (кластер Арарат), достаточно явно (+1.8) — олиго-мезотрофные субальпийского (кластер

**Таблица 4.** Стандартизованные коэффициенты канонических дискриминантных функций (корней) и кумулятивная доля объясненной дисперсии

Параметр	Корень 1	Корень 2	Корень 3
C/N	-1.18	0.06	-0.58
C <sub>ГК</sub> /C <sub>ФК</sub>	-1.21	0.05	0.77
(ΣГК + ΣФК)	-1.13	-0.38	-1.14
C <sub>0.02 н NaOH</sub> /C <sub>0.1 н NaOH</sub>	0.90	0.23	-0.09
Гемицеллюлоза	-0.40	-1.16	0.44
Целлюлоза	-0.20	1.03	0.29
Кумулятивная доля объясненной дисперсии			
Накопленный %	80	96	100

Пихтерек). Корнем 2 – показателем сохранности исходных растительных остатков – различаются в основном торфяные почвы лесного пояса: мезо-эуτροφные горно-таежного пояса кластер Бюря (среднее значение дискриминантной функции -0.8) и эуτροφные подтаежно-лесостепного (+1.8) кластер Печище+Тунгузульт.

Таким образом, состояние органического вещества торфяных почв, сформированных на различных высотных отметках комплексом экологических условий, отвечает высотно-поясной структуре биогеосистем восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Охарактеризуем особенности группового и фракционного состава органического вещества горных торфяных почв, объективно систематизированных в кластеры.

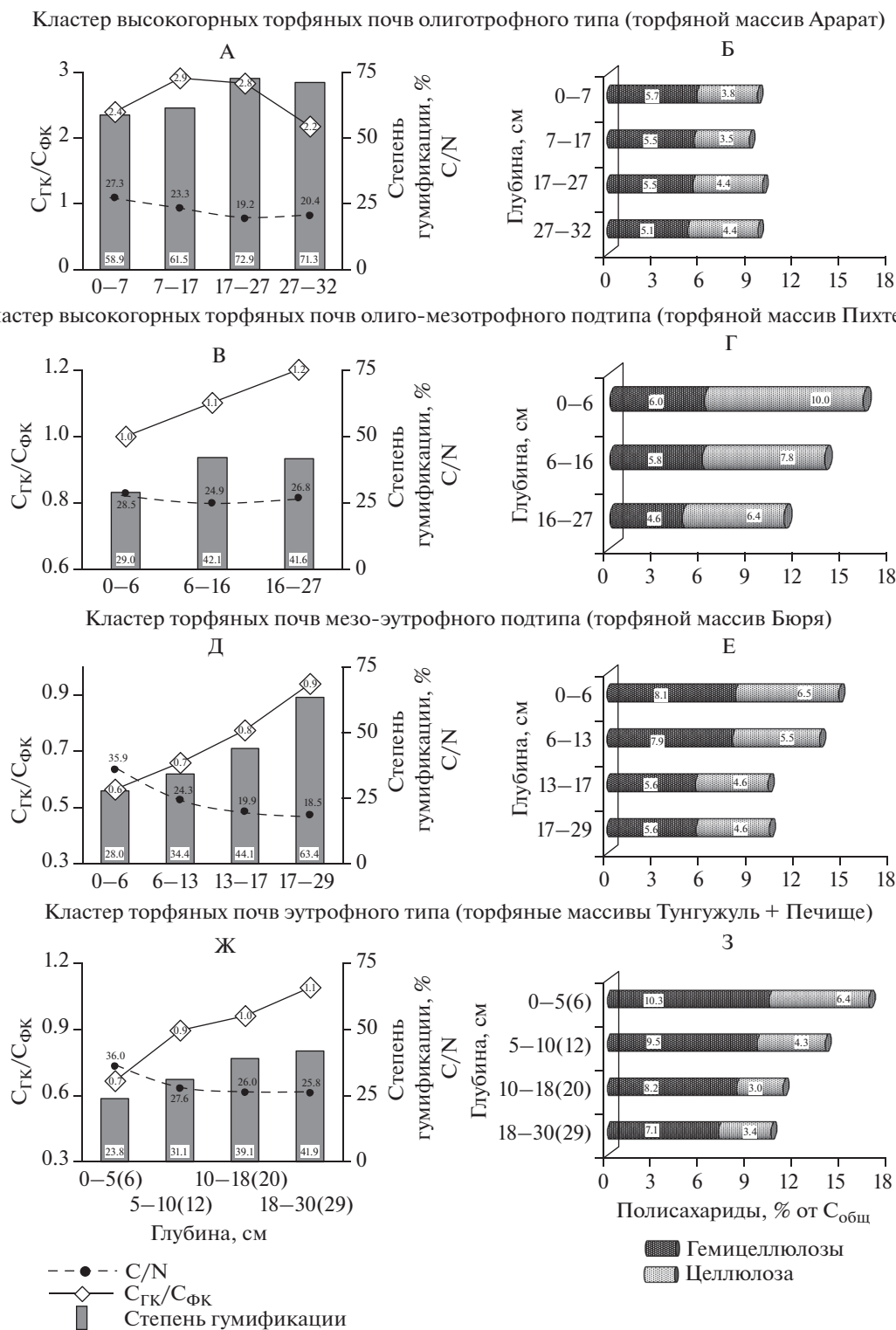
**Кластер криогенных торфяных почв олиготрофного типа высокогорного альпийско-тундрового пояса.** Современные почвы каровых болот отличаются высокой степенью гумификации 60–79%, слабо дифференцированным почвенным профилем на слои 0–17 и 17–32 см, чисто гуматным типом гумуса (C<sub>ГК</sub>/C<sub>ФК</sub> > 2) и низким (в среднем 9.5% от C<sub>орг</sub>), одинаковым по профилю количеством полисахаридов (рис. 4А, 4Б). В составе как гуминовых, так и фульвокислот преобладает фракция 1, экстрагируемая 0.1 н NaOH при комнатной температуре (рис. 5А).

Прослеживается явная аналогия процессов гумусообразования в высокогорных мерзлых торфяниках и минеральных тундровых почвах европейской части России. Особенности био-климатической обстановки (продолжительное низкотемпературное состояние почвы, поверхностное избыточное увлажнение) приводят к вымораживанию влаги, вызывая коагуляцию, осаждение и переход в слаборастворимое состояние органоминеральных коллоидов, сопровождаемая ослаблением профильной дифференциации гумуса и формированием специфического пропитанно-мерзлотного тундрового типа гумусового профиля с высоким содержанием гуминовых кислот фракции 1 и низким количеством фульвокислот [2]. Почвы высокогорных каро-

вых болот практически сходны по гумусному состоянию с верховыми почвами зоны тайги Западной Сибири, испытывавшими воздействие торфяных пожаров. В пирогенных прослойках (в условиях избытка воды и недостатка кислорода) за счет термической преимущественно абиогенной деструкции наблюдается высокая степень гумификации 46.2–57.4% растительного субстрата, преимущественное увеличение фракции ГК1, расширение до 2–3 отношения C<sub>ГК</sub>/C<sub>ФК</sub> и выраженное снижение количества полисахаридов [43]. Следовательно, несмотря на очевидную разнородность комплекса физико-химических процессов пирогенного воздействия или промораживания, непрерывный ряд преобразований органических остатков, согласно теории гумификации Орлова [18], приостанавливается на стадии устойчивых продуктов трансформации – гуминовых веществ независимо от факторов среды и типа почвы.

**Кластер торфяных почв олиго-мезотрофного подтипа субальпийского пояса.** Гумусное состояние верхово-переходных почв отличается от мерзлых верховых значительно меньшей (в 1.5–2 раза) степенью гумификации, пропорциональным повышением содержания целлюлозы (исходных органических остатков) и фульватно-гуматным типом гумуса (рис. 4В, 4Г). Относительно олиготрофных почв глубокая перестройка наблюдается во фракционном составе гуминовых кислот (рис. 5В). Приближается к уровню доминирующей доля фракции 3, пептизируемой 0.02 н NaOH на водяной бане, которая типична для органогенно-аккумулятивного почвообразования [7]. В составе фульвокислот ведущая роль по-прежнему принадлежит первой фракции (рис. 5Г).

**Кластер мезо-эуτροφных подтипов торфяных почв горно-таежного пояса.** Гумусовый профиль почв, занятых ельниками, отличается выраженной дифференциацией благодаря последовательно возрастающей степени гумификации с глубиной (рис. 4Д). Отношение C<sub>ГК</sub>/C<sub>ФК</sub> характеризует в верхних горизонтах 6–13 см фульватный тип гумуса, в нижних – гуматно-фульватный. Количество



**Рис. 4.** Состояние органического вещества кластеров горных торфяных почв: степень гумификации, отношения С/N, С<sub>ГК</sub>/С<sub>ФК</sub> (А, В, Д, Ж) и содержание гемицеллюлозы и целлюлозы (Б, Г, Е, З).

полисахаридов снижается сообразно росту гумусовых веществ (рис. 4Е). В группе гуминовых и фульвокислот доля фракции 3 явно доминирует, составляя 52–57% от  $\Sigma$ ГК и 39% от  $\Sigma$ ФК (рис. 5Д, 5Е).

**Кластер эутрофных торфяных почв подтаежно-лесостепного пояса** по гумусному состоянию наиболее близок к подтипу мезо-эутрофных. Почвенный профиль также отражает возрастаю-



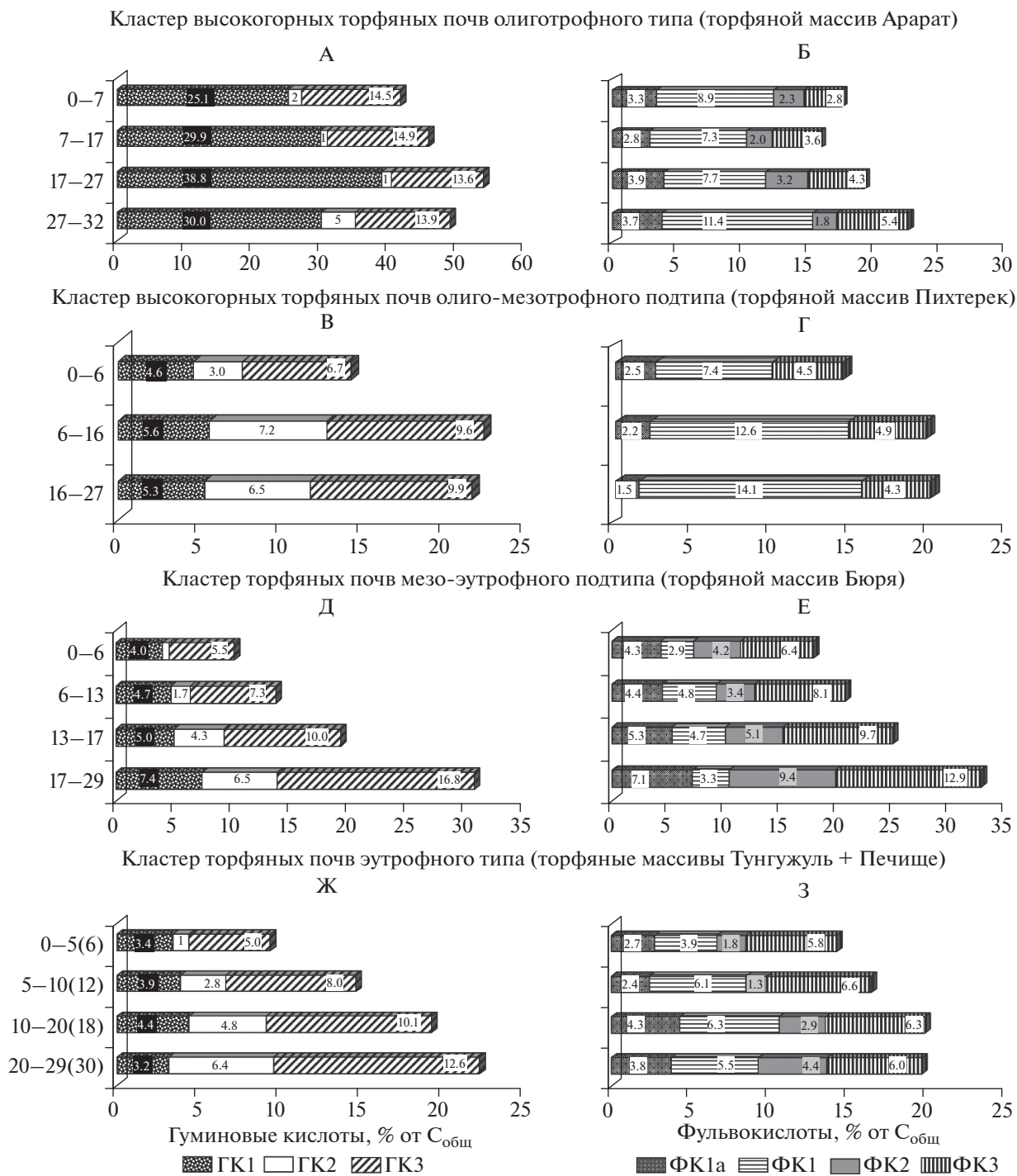


Рис. 5. Фракционный состав гуминовых кислот (А, В, Д, Ж) и фульвокислот (Б, Г, Е, З) кластеров горных торфяных почв.

шую степень гумификации с глубиной, отношение  $C_{ГК}/C_{ФК}$  характеризует близкий по типу состав гумуса: гуматно-фульватный верхних горизонтов 0–10(12) см и фульватно-гуматный нижних (рис. 4Ж). Эуτροφные почвы своеобразны в большей мере составом полисахаридов: доля гемицеллюлоз в структуре углеводов заметно выше, чем в мезо-эуτροφных почвах (рис. 43).

В контексте изложенного повышение степени гумификации торфяных почв восточного макросклона Кузнецкого Алатау при переходе от лесного (500–800 м) к альпийско-тундровому поясу (1100–1500 м) характеризует общие признаки горного почвообразования – увеличение гумусированности с высотой, установленной прежде для горных почв минерального ряда [39, 46].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на основе показателей состояния органического вещества торфяных почв восточного макросклона Кузнецкого Алатау выполнено их разделение на группы схожих между собой объектов (кластеров), которые соответствуют диагностике на типы и подтипы по принципу насыщенности основаниями и величине  $pH_{H_2O}$ , а также высотной структуре растительного покрова.

Систематизацию торфяных массивов в однородные группы выполнили методами многомерного статистического анализа (кластерного, дискриминантного и канонического). Выделено две дискриминирующие функции (комплекс информативных признаков), характеризующих различную степень трансформации растительной субстанции и гетерогенность кластеров торфяных почв по состоянию органического вещества. Первая функция (корень 1) характеризует гумусное состояние, то есть глубину преобразования растительного материала: наибольший вес в значении корня 1 вносят степень гумификации ( $\Sigma GK + \Sigma FK$ ), тип гумуса ( $C_{GK}/C_{FK}$ ), отношения  $C/N$  и  $C_{0.02\text{ н NaOH}}/C_{0.1\text{ н NaOH}}$ . Корень 1 обладает наибольшими дискриминирующими возможностями объяснять долю изменчивости (80%) между олиготрофными торфяными почвами альпийско-тундрового пояса и олиго-мезотрофными почвами субальпийского пояса. Корень 2 отражает степень сохранности исходных растительных компонентов, в который наибольший совокупный вклад вносят гемицеллюлозы и целлюлоза. Дискриминирующие возможности корня 2 характеризуют меньшую долю различия (16%) между кластерами мезо-эуτροφных торфяных почв горно-таежного пояса и эуτροφных подтаежно-лесостепного.

Организация гумусного состояния горных торфяных почв отражает общие признаки горного почвообразования – увеличение гумусированности с высотой. Криогенные олиготрофные торфяные почвы альпийско-тундрового высотного пояса характеризуются самой высокой степенью гумификации 60–79%, чисто гуматным типом гумуса ( $C_{GK}/C_{FK} > 2$ ), монотонным пропитанно-мерзлотным типом гумусового профиля и преобладанием фракции 1 в составе гумусовых кислот. Мезо-эуτροφные почвы горно-таежного пояса выделяются четко дифференцированным, менее гумифицированным почвенным профилем (28–63%), в основном фульватным типом гумуса и доминированием в составе гумусовых кислот фракции 3. Кластер эуτροφных типов торфяных почв подтаежно-лесостепного пояса слабее других гумифицирован (24–42%), характеризуется преимущественно фульватно-гуматным типом гумуса и самым высоким содержанием гемицеллюлоз в составе полисахаридов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ариунушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
2. *Арчегова И.Б.* Гумусообразование на севере Европейской территории СССР. Л.: Наука, 1985. 136 с.
3. *Бочарников М.В., Исмаилова Д.М.* Высотная поясность растительного покрова восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2011. № 6. С. 76–84.
4. *Волкова И.И., Волков И.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Кирпотина Л.В., Земцов В.А., Колмакова М.В., Кураев А.В., Захарова Е.А., Кирпотин С.Н.* Горная озерно-болотная система урочища Ештыкель (горный Алтай) // Вестник ТГУ. Биология. 2010. 1(9). С.118–137.
5. *Ефремов С.П.* Болота зоны КАТЭКа в связи с перспективами их хозяйственного использования и охраны // Почвы зоны КАТЭКа. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1981. С. 41–56.
6. *Ефремова Т.Т.* Биохимические и окислительно-восстановительные процессы в осушенных почвах юга Красноярского края // Почвоведение. 1977. № 9. С. 103–114.
7. *Ефремова Т.Т.* Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.
8. *Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П.* Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 73–83.
9. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В., Аврова А.Ф.* Высотная дифференциация кислотно-основных свойств долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау // Вестник ТГУ. Биология. 2018. № 41. С. 135–155.  
<https://doi.org/10.17223/19988591/41/8>
10. *Ильинский Н.И.* Почвы Кузнецкого Алатау. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1970. 166 с.
11. *Кудяров В.Н.* Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1061.
12. *Кулижский С.П.* Эффективный способ использования природоохранных территорий // Вестник ТГУ. Биология. 2008. № 1. С. 42–56.
13. *Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014.* Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 ФАО и МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 203 с.
14. *Морозова Р.М.* К вопросу о классификации болотных осушенных почв // Изменение лесоболотных биогеоценозов под влиянием осушения. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1986. С. 108–124.
15. *Мульдьяров Е.Я., Лапшина Е.Д.* К изучению болот Кузнецкого Алатау // Сибирский экологический журнал. 2000. № 5. С. 645–652.

16. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 21. Кн. 2. Красноярский край, Тувинская АССР. Л.: Гидрометеопиздат, 1990. 408 с.
17. Низовцев Н.А., Холодов В.А., Иванов В.А., Фарходов Ю.Р., Дымов А.А. Неспецифические органические соединения торфяных почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1090–1097. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070085>
18. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
19. Платонов Г.М. Болота лесостепи Средней Сибири. М.: Наука, 1964. 116 с.
20. Пономарева В.В., Николаева Т.А. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. 1961. № 5. С. 88–95.
21. Пьявченко Н.И. Степень разложения торфа и методы ее определения. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1963. 56 с.
22. Пьявченко Н.И., Корнилова Л.И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
23. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Шепотьев В.Н., Дмитренко В.Н., Тюгай З.Н., Хохлов С.Ф. Варьирование микроморфологических показателей строения пор в суглинистых почвах южной тайги и лесостепи европейской территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1061–1072.
24. Седельников В.П. Флора и растительность высокогорий Кузнецкого Алатау. Новосибирск: Наука, 1979. 167 с.
25. Седельникова Н.В. Лишайники в структуре темной хвойных лесов Алтая и Кузнецкого нагорья // Ботанический журн. 1993. Т. 78. № 10. С. 23–31.
26. Смирнов М.П. Почвы Западного Саяна. М.: Наука, 1970. 236 с.
27. Скрынникова И.Н. Классификация целинных болотных и мелиорированных торфяных почв СССР // Почвоведение. 1964. № 5. С. 14–26.
28. Тайсаев Т.Т. Геохимия таежно-мерзлотных ландшафтов и поиски рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1981. 136 с.
29. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных: М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 515 с.
30. Bao K., Wang G., Xing W., Shen J. Accumulation of organic carbon over the past 200 years in alpine peatlands, northeast China // Environ. Earth Sci. 2015. V. 73(11). P. 7489–7503. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3922-1>
31. Biester H., Hermanns Y.-M., Martinez Cortizas A. The influence of organic matter decay on the distribution of major and trace elements in ombrotrophic mires – a case study from the Harz Mountains // Geochim Cosmochim Acta. 2012. V. 84. № 1. P. 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.01.003>
32. Borrego A.G., Lopez-Dias V., Urbanczyk J. Relationship between the vegetation and the biomarkers and palynological assemblages in asturian mires (N Spain) // Book of Abstracts 26th International Meeting on Organic Geochemistry. Costa Adeje, Tenerife, Spain, 2013. V. 1. P. 318–319.
33. Chen Jenn-Shing, Chung Tay-Lung, Tian Guanglong, Chiu Chih-Yu. Characterization of soil organic matter in perhumid natural cypress forest: comparison of humification in different particle-size fractions // Botanical Studies. 2013. V. 54. P. 56–63. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-56>
34. Čížková H., Květ J., Comín F., Laiho R., Pokorný J., Pithart D. Actual state of European wetlands and their possible future in the context of global climate change // Aquatic Sciences. 2013. V. 75. P. 3–26.
35. Delarue F., Laggoun-Défarge F., Disnar J.R., Lottier N., Gogo S. Organic matter sources and decay assessment in a Sphagnum-dominated peatland (Le Forbonnet, Jura Mountains, France): impact of moisture conditions // Biogeochemistry. 2011. V. 106. P. 39–52. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9410-0>
36. Dise N.B. Peatland response to global change // Science. 2009. V. 326. P. 810–811.
37. Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. Classification of Morphogenetic Types of Mossy Litter in Paludine Spruce Forests Based on Humus Content // Contemporary Problems of Ecology. 2017. V. 10. № 7. P. 728–737.
38. Laiho R., Pearson M. Surface peat and its dynamics following drainage – do they facilitate estimation of carbon losses with the C/ash method? // Mires and Peat. 2016. V. 17. P. 1–19. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.247>
39. Lemenih M., Itanna F. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation type and arable lands along elevation gradient in Southern Ethiopia // Geoderma. 2004. V. 123. № 1–2. P. 177–188.
40. Li Huan, Xu Dingyi, Zhao Yan. Peatland area change in the southern Altay Mountains over the last twenty years based on GIS and RS analysis // Frontiers of Earth Science. 2014. V. 8. № 4. P. 558–563.
41. Lopez-Dias V., Blanco C.G., Bechtel A., Pittmann W., Borrego A.G. Different source of n-alkanes and n-alkan-2-ones in a 6000 cal. yr BP Sphagnum-rich temperate peat bog (RoZanzas, N Spain) // Organic geochemistry. 2013. V. 57. P. 7–10. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.04.006>
42. Peatlands of the Western Guayana Highlands. Venezuela/Eds.: J.A. Zinck, O. Huber. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 308 p.
43. Yefremova T.T., Yefremov S.P. Ecological Effects of Peat Fire on Forested Bog Ecosystems/Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / Ed. Y.G. Goldammer, V.V. Furyaev. Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 350–357.
44. Scheer M.B., Curcio G.R., Roderjan C.V. The Late Holocene upper montane cloud forest and high altitude grassland mosaic in the Serra da Igreja, Southern Brazil // An. Acad. Bras. Scienc. 2013. V. 85. № 2. P. 769–783.
45. Scheer M.B., Curcio G., Roderjan C.V. Carbon and water in upper montane soils and their influences on vegetation in Southern Brazil // ISRN Soil Science. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/348905>
46. Shishkov T., Kolev N. The Soils of Bulgaria. World Soils Book Series. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2014. 208 p.

## Formal Criteria of the Humus Status of Mountainous Peat Soils at the Level of Altitudinal Zones

T. T. Efremova<sup>a,\*</sup>, S. P. Efremov<sup>a</sup>, N. V. Melent'eva<sup>a</sup>, and A. F. Avrova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sukachev Institute of Forestry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

*\*e-mail: efr2@ksc.krasn.ru*

Cryogenic oligotrophic (Hyperdystric Cryic Fibric Histosols), oligo-mesotrophic (Dystric Fibric Histosols), meso-eutrophic (Oligoeutric Fibric Histosols), and eutrophic (Hypereutric Fibric Histosols) peat soils on the eastern slopes of the Kuznetsk Alatau Ridge (Khakassia Republic) were studied. Their altitudinal differentiation was examined, and their clustering according to qualitative and quantitative composition of organic matter was performed. The most informative indicators of similarity and/or differences of the clusters were suggested. The group composition of organic matter was studied using acid and alkaline extractions. Multivariate statistical analyses (cluster, discriminant, and canonic) were applied for evaluation of the humus state of soils. Significant indicators of the organic matter status form two discriminant functions. Function 1 discriminates between the clusters (80%) and includes the following indicators: humification degree ( $\Sigma\text{HA} + \Sigma\text{FA}$ ), type of humus ( $C_{\text{ha}}/C_{\text{fa}}$  ratio), and ratio between the fractions of humic acids extracted by 0.02 N and 0.1 N NaOH ( $C_{0.02\text{N NaOH}}/C_{0.1\text{N NaOH}}$ ). Function 1 clearly separates permafrost-affected oligotrophic peat soils of the tundra zone (>1460 m a.s.l.) from oligo-mesotrophic peat soils of the subalpine zone (1087 m a.s.l.). Function 2 discriminates between the clusters of peat soils of the forest zone—meso-eutrophic peat soils of the taiga zone (832 m a.s.l.) and eutrophic peat soils of the subtaiga—forest-steppe zone (622–573 m a.s.l.) at the 16% difference level. The humus status of the mountainous peat soils corresponds to their diagnostics according to the base saturation and pH criteria and reflects a general tendency for an increase in the soil humus content at higher altitudes, which has earlier been shown the mineral soils.

*Keywords:* mountainous peat soils, organic matter, diagnostics, formalized classification, multivariate statistical analysis