

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.461

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ЛУГОВО-СТЕПНЫХ ПОЧВ ПАСТБИЩ РАЗНЫХ СТАДИЙ ДИГРЕССИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

© 2023 г. Ф. В. Гедгафова^а, О. Н. Горобцова^а, Т. С. Улигова^а, Н. Л. Цепкова^а, Е. М. Хакунова^а,
К. Х. Даова^а, Р. Х. Темботов^{а, б, *}

^аИнститут экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН,
ул. И. Арманд, 37а, Нальчик, 360051 Россия

^бСанкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: ecology_lab@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Определены показатели биологической активности (содержание и запасы гумуса, содержание и запасы углерода микробной биомассы, активность ферментов классов гидролаз и оксидоредуктаз) верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв Центрального Кавказа (Кабардино-Балкария) при разных стадиях пастбищной дигрессии (Д1, Д2, Д3). Установлено, что значения контролируемых почвенных показателей в условиях слабо- (Д1) и средненарушенных (Д2) луговых фитоценозов достоверно не отличаются ($t < 1.97$; $P > 0.05$). В почвах сильнонарушенных луговых степей (Д3) выявлены статистически значимые снижения ($t > 2.95$; $P < 0.05$) биологических параметров по сравнению с менее поврежденными лугами (Д1 и Д2). На основе совокупности изученных показателей биологической активности рассчитан интегральный показатель эколого-биологического состояния почв (ИПЭБСП), отражающий общий уровень биологической активности изученных почв при разных стадиях дигрессии лугово-степных сообществ. Отмечено снижение ИПЭБСП умеренно выпасаемых (Д2) и перевыпасаемых (Д3) лугов относительно величин условного эталона (Д1) на 11 и 45% соответственно. Полученные результаты биологического состояния горных лугово-степных почв используются для мониторинговых исследований, направленных на оценку степени изменения почвенно-растительного покрова горных пастбищных экосистем.

Ключевые слова: субальпийские луга, пастбища, гумус, углерод микробной биомассы, активность ферментов, Mollic Leptosols Eutric

DOI: 10.31857/S0032180X22601268, **EDN:** FPEHGC

ВВЕДЕНИЕ

Одним из традиционных направлений высокогорного природопользования на Центральном Кавказе является пастбищное освоение горно-луговых экосистем. Естественные кормовые угодья (сенокосы и пастбища) занимают более 50% горных территорий Кабардино-Балкарской Республики [31]. Под пастбища вовлечено около 72% и сенокосы – 14% площади горных лугово-степных почв [25].

Длительная и интенсивная пасторальная нагрузка на горные луга приводит к дигрессии растительного покрова, проявляющейся в изменении видового состава, снижении общего проективного покрытия, высоты травостоя и запаса надземной фитомассы [13, 29, 31, 39]. Существенному изменению подвергается и почвенный по-

кров горных экосистем. Происходит нарушение целостности дернины, образование скотобойных троп, развитие эрозионных процессов, приводящих к частичной или полной потере верхних горизонтов и всего гумусового профиля высокогорных почв [21, 29]. Последствия активного выпаса скота на луговые экосистемы отмечаются в изменении морфологических (мощность профиля и дернового горизонта), физико-химических (влажность, плотность сложения, содержание гумуса) и биологических (микробные показатели, активность ферментов) параметров пастбищных почв [15, 18, 36].

Уплотнение и перегрев почвы, увеличение физического испарения и снижение влажности, в свою очередь, способствуют ксерофитизации растительного покрова [1]. Установлено, что на сбитых пастбищах высокогорной зоны Кабарди-

но-Балкарии температура почвы на глубине 50 см повышается в среднем на 3°C по сравнению с ненарушенными лугами, а влажность в слое 40–50 см уменьшается на 5–9% [31]. Согласно имеющимся сведениям [29, 31], продуктивность сенокосов и пастбищ Республики сократилась в 2–3 раза, а в некоторых случаях до 10 раз. Учитывая изложенное, особую актуальность приобретает сбор и систематизация подробной информации, позволяющие осуществлять мониторинг и оценку современного состояния луговых экосистем, необходимых для сохранения природных ресурсов горных территорий Центрального Кавказа.

Исследуемые горные лугово-степные почвы встречаются редко и только в субальпийском поясе. Они развиваются на сухих склонах южной и юго-восточной экспозиций Скалистого и Бокового хребтов. В научной литературе подробно освещены вопросы, касающиеся изучению закономерностей их распространения, особенности морфологии и физико-химических свойств [21, 26, 29]. Определение биологических характеристик горных лугово-степных почв Центрального Кавказа не проводилось, хотя многочисленные данные подтверждают высокую эффективность такого рода исследований при сравнительной оценке естественных и антропогенно-нарушенных почв [11, 18, 30, 36].

Следует отметить, что изучение показателей биологической активности различных типов горных почв, в том числе горно-луговых, пастбищных и естественных экосистем ведется на Северо-Западном Кавказе в пределах Адыгеи [15, 18] и Карачаево-Черкесии [37]. В последние годы появились работы, раскрывающие особенности биологического состояния террасовых почв, развитых на различных почвообразующих породах в горной зоне Восточного Кавказа (Дагестан) [7, 24]. Представляют интерес, проводимые за рубежом исследования, которые посвящены оценке изменения уровня биологической активности почв, подверженных пастбищному использованию [35, 38, 40, 43].

Согласно исследованиям авторов [7, 8, 18–20], для объективной достоверной оценки биологической активности почв достаточно определения таких информативных параметров, как содержание гумуса, респираторных показателей метаболической активности почвенной микробной биомассы, активность окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов. Совокупность перечисленных показателей биологической активности, отражающих различные аспекты биологических свойств почв (генетические, микробиологические, биохимические), позволяет установить общий уровень биологической активности и выразить его через интегральный показатель эколого-биологического состояния почв (ИПЭБСП) [18].

Настоящая работа является частью цикла научных исследований, направленных на изучение биологической активности высокогорных почв Центрального Кавказа, подверженных пастбищной нагрузке [36]. Оценка степени изменения параметров и общего уровня биологической активности почв позволяет проследить направление и динамику процессов деградации пастбищных луговых экосистем Центрального Кавказа.

Цель исследования — установить показатели и общий уровень биологической активности горных лугово-степных почв субальпийского пояса Центрального Кавказа (в пределах Кабардино-Балкарии) при разных уровнях пастбищной дигрессии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования охватывает верховья Баксанского ущелья (Южное Приэльбрусье) Кабардино-Балкарии (рис. 1).

Объектом исследования являются горные лугово-степные почвы, широко представленные под этим названием в научной литературе — “Классификации и диагностике почв СССР” (1977 г.). По “Классификации и диагностике почв России” (2004 г.) они включены в состав типа темногумусовых отдела органо-аккумулятивных почв. В мировой классификационной почвенной системе WRB (2014 г.) исследуемые почвы рассматриваются в составе реферативной почвенной группы Mollic Leptosols Eutric; по классификации FAO (1988 г.) — Mollic Leptosols [42].

Горные лугово-степные почвы залегают на склонах различной крутизны и экспозиций под остепненными лугами и луговыми степями, которые длительное время используются под пастбища и сенокосы. Почвообразующими породами служат элюво-делювий сланцев, гранитов, гнейсов, известняков, песчаников и др. [25, 29].

Почвы относятся к видам рыхлодернинных, разновидностям слабощебенчатых (содержание щебня от объема горизонта <10%), слабо- и среднекаменистых (10–20 и 20–40% соответственно). Темноокрашенный гумусовый горизонт описываемых почв (мощностью 10–15 см, с содержанием гумуса от 8 до 15%) обладает мелкокомковато-мелкозернистой структурой. Гранулометрический состав в основном средне- и легкосуглинистый. Почвы слабокислые ($pH_{KCl} < 6.0$); характерна высокая степень насыщенности основаниями [21, 29, 42].

Распространение остепненных лугов и луговых степей и сформировавшихся под ними почв в Южном Приэльбрусье связано как с экспозиционными особенностями их расположения, так и с многолетним пастбищным воздействием, при-

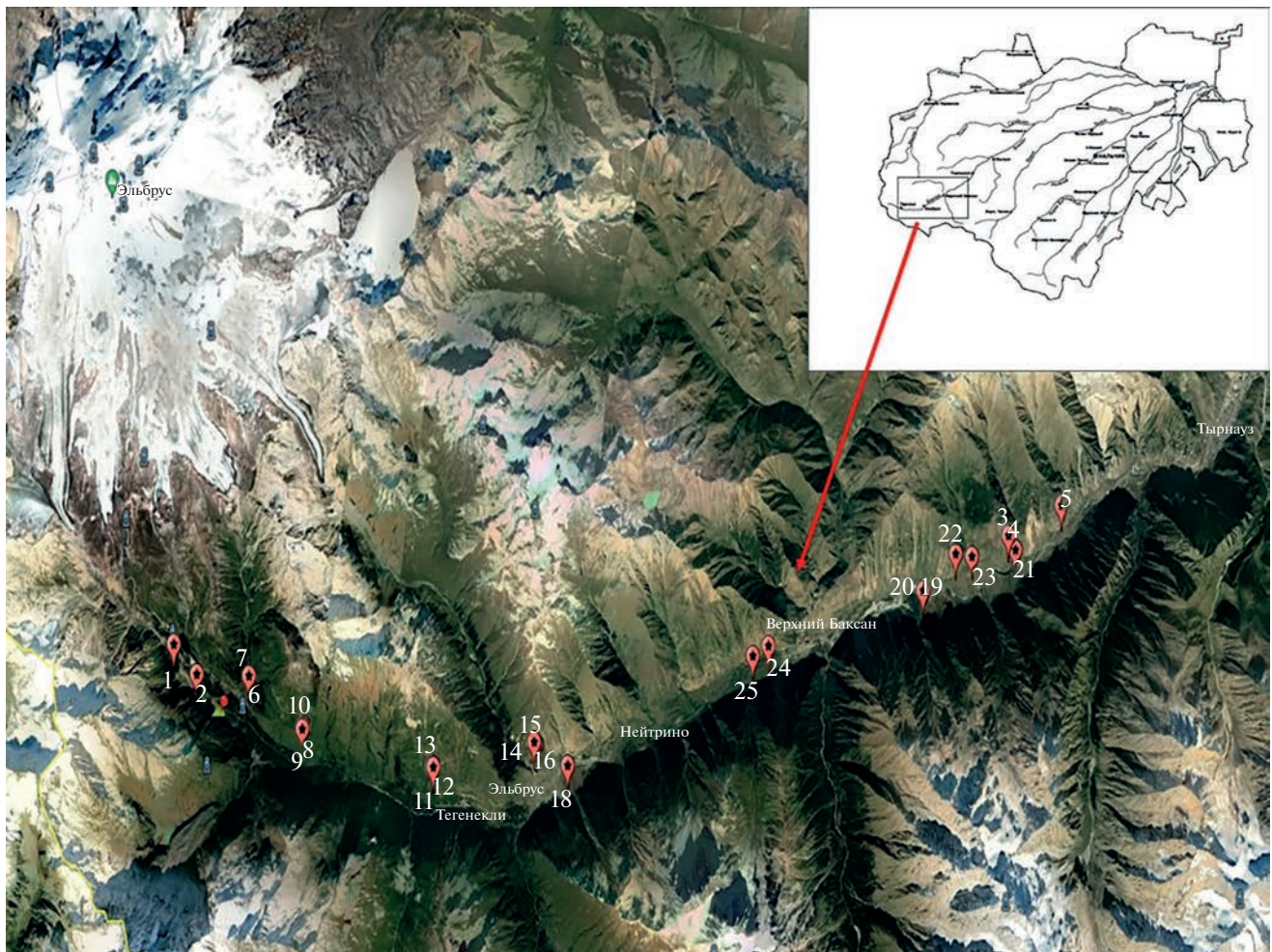


Рис. 1. Район исследования горных лугово-степных почв субальпийского пояса Кабардино-Балкарии (Баксанское ущелье).

ведшим к антропогенной ксерофитизации ландшафтов [1].

Климатические особенности района исследований, как и всего Центрального Кавказа, определяются горным рельефом, большими перепадами высот, поступлением западных воздушных масс со стороны Атлантики. Климат характеризуется прохладным летом и относительно теплой зимой [29]. Среднемесячная температура воздуха в январе колеблется в пределах от -3.0 до -7.4°C , а самого теплого месяца июля — от $+9.3$ до $+15.6^{\circ}\text{C}$. годовая сумма осадков составляет около 900 мм (по данным метеостанции “Терскол”; 2150 м над ур. м., <https://ru.climate-data.org/>).

Горные луговые степи Южного Приэльбрусья представлены низкоосоково-типчаковыми и типчаково-низкоосоковыми, разнотравно-типчаковыми, типчаково-полынными сообществами. Активное и многолетнее антропогенное воздействие (выпас, рекреационное использование) на луговые степи привело к дигрессии растительного покрова.

В связи с этим эталонные неповрежденные луга (стадия Д0) на сухих склонах Баксанского ущелья не обнаружены.

При выборе местоположения мониторинговых площадок для изучения современного состояния горных лугово-степных почв выполняли геоботанические описания [31] и выделяли остепненные сообщества, соответствующие различным стадиям пастбищной дигрессии Д1, Д2, Д3. Номенклатура видов дана в соответствии с базой The Plant List (<http://www.theplantlist.org>). В качестве условного эталона использовали наиболее сохранившиеся лугово-степные сообщества, расположенные на огороженных участках (сенокосах) — первая стадия (Д1). Для данной стадии характерны высокое проективное покрытие травостоя с доминированием костреца пестрого (*Bromus variegatus*), выраженная ярусность, единичное присутствие синантропных видов (рис. 2).

Для средненарушенных сообществ, соответствующих второй стадии пастбищной дигрессии



Рис. 2. Слабонарушенные остепненные луга (Д1 — условный эталон) субальпийского пояса (Баксанское ущелье).



Рис. 3. Умеренно выпасаемые (Д2 — средненарушенные) (а) и перевыпасаемые (Д3 — сильнонарушенные) (б) луговые степи субальпийского пояса (Баксанское ущелье).

(Д2), проективное покрытие костреца пестрого (*B. variegatus*) составляет не более 5–10%. Высоким обилием в травостое отличаются устойчивые к выпасу овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*), осока низкая (*Carex humilis*), а также виды родов — бобовые (*Trifolium*) и манжетковые (*Alchemilla*). Они характеризуются двухъярусной вертикальной структурой, развитой дерниной при отсутствии микротеррасирования и оголенных участков почвы. При умеренной пастбищной нагрузке это хорошие весенне-летне-осенние пастбища для овец. Овсяница валлиская (*F. valesiaca*) — многолетний плотнодернинный ксеромезофитный злак с высокими кормовыми качествами,

устойчивый к неумеренному выпасу скота. Осока низкая (*C. humilis*) — многолетнее короткокорневищное растение, ценное в кормовом отношении. Хорошо поедается всеми видами скота (особенно в молодом состоянии), выносит вытаптывание и легко отрастает после сжавливания (рис. 3).

Сильнонарушенные низкотравные сообщества соответствуют третьей стадии дигрессии (Д3), для которой характерно высокое участие в травостое синантропных, в том числе непоедаемых видов растений: молочай Сегиеров (*Euphorbia seguieriana*), лапчатка вильчатая (*Sibbaldianthe bifurca*), бодяк корнеголовый (*Cirsium rhizocephalum*), бодяк окутанный (*Cirsium obvallatum*), подорож-

Таблица 1. Приоритетные показатели лугово-степных фитоценозов субальпийского пояса (Баксанское ущелье) при разных стадиях дигрессии

Показатель	Стадия дигрессии растительных сообществ		
	Д1 <i>n</i> = 10	Д2 <i>n</i> = 6	Д3 <i>n</i> = 9
Общее проективное покрытие, %	97 ± 2.1	85 ± 6.1	63.6 ± 3.6
Высота травостоя, см	32.1 ± 7.3	18.8 ± 3.2	5.8 ± 1.9
Запас живой надземной фитомассы (воздушно-сухая масса), ц/га	27.9 ± 2.3	25.2 ± 2.0	11 ± 1.7

Примечание. $\bar{X} \pm m$ – среднее и ошибка среднего. То же в табл. 2, 3, 4.

ник кавказский (*Plantago saxatilis*), а также наличие эродированных и микротеррасированных участков (скотобойных троп). Запасы живой надземной фитомассы на данной стадии (табл. 1) значительно снижены ($P < 0.05$) по сравнению с более сохранившимися лугово-степными сообществами (Д1 и Д2).

Сбор и анализ образцов для определения физико-химических и биологических свойств горных лугово-степных почв осуществляли в первой декаде июля 2019–2021 гг. в соответствии с методиками [16, 17]. Всего заложили 25 мониторинговых площадок площадью 900 м² каждая на лугах разной стадии дигрессии, расположенных на пологих формах рельефа в нижней части склонов. Количество почвенных проб, характеризующих каждую стадию пастбищной дигрессии, составляло 6–10 образцов. Почвы отбирали с каждой мониторинговой площадки методом “конверта” в верхних горизонтах, на глубину до 10 см. Одновременно проводили геоботаническое описание площадок. На каждой из них определяли общее проективное покрытие травостоя (%), его среднюю высоту (см), составляли список видов с указанием их количественного участия. Для определения запасов живой надземной фитомассы использовали метод отбора проб травостоя [5]. На учетных площадках размером 50 × 50 см в трехкратной повторности отбирали укусы для определения запасов живой надземной фитомассы. Срезанную под корень фитомассу взвешивали с точностью 1–2 г, высушивали до воздушно-сухого состояния и снова взвешивали. Полученные данные усредняли и переводили в ц/га.

При определении мест отбора проб использовали картографические материалы [22]. Высоту над уровнем моря и географические координаты определяли с помощью навигатора Garmin GPS-MAR 60Cx: высотные пределы точек отбора проб – 1410–2355 м над ур. м., координаты 43.25578–43.34838 N, 42.48546–42.85082 E.

Лабораторно-аналитические исследования выполняли в 3–6-кратной повторности. Содержание гумуса (%) в почве определяли по методу Тюрина в модификации Никитина, рН солевой суспензии (KCl 0.1 н.) – потенциметрически,

полевую влажность и плотность почв – весовым методом. Запасы гумуса в слое 0–10 см рассчитывали, используя показатели плотности почв в ненарушенном сложении (объемная масса) [16, 17].

Скорость базального (БД) и субстрат-индуцированного дыхания (СИД), характеризующих фоновую и потенциальную дыхательную активности почвенной микробной биомассы, определяли в соответствии с методическими разработками Ананьевой [3]. Содержание углерода микробной биомассы почвы вычисляли по формуле: $C_{\text{мик}} (\text{мкг С/г почвы}) = \text{СИД} (\text{мкл CO}_2/(\text{г почвы ч})) \times 40.04 + 0.37$ [32]. Запас углерода микробной биомассы в слое 0–10 см установили с учетом плотности сложения. Долю углерода микробной биомассы (%) в общем органическом углероде почвы рассчитали, как отношение содержания углерода микробной биомассы к общему содержанию органического углерода в почве: $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$. Величину коэффициента микробного дыхания определяли как отношение скорости БД к скорости СИД: $Q_R = \text{БД}/\text{СИД}$ [6].

Активность ферментов (фосфатазы, уреазы, инвертазы, дегидрогеназы) определяли колориметрически, каталазы – газометрически по методикам Галстяна в модификации Хазиева [17]. Полученные биологические показатели оценивали по шкале Гапонюк, Малахова [10].

Для объединения различных параметров биологической активности почв в единый показатель, служащий критерием общего уровня биологической активности, использовали методику расчета ИПЭБСП [18].

Статистическую обработку полученных данных осуществляли в программе Statistica-10.0. Достоверности различия изученных почвенных характеристик сравниваемых участков оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $P \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований физических, физико-химических и биологических свойств верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв условно эталонных (Д1) и в

Таблица 2. Средние величины характеристик верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв при разных стадиях дигрессии

Показатель	Стадия дигрессии растительных сообществ		
	Д1 <i>n</i> = 10	Д2 <i>n</i> = 6	Д3 <i>n</i> = 9
pH _{KCl}	5.5 ± 0.2	5.5 ± 0.1	6.1 ± 0.2
Плотность сложения, г/см ³	0.9 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.3 ± 0.03
Содержание гумуса, %	14.6 ± 1.4	11.5 ± 0.9	6.4 ± 1.0
Запас гумуса, т/га	257 ± 22	211 ± 11	162 ± 21

Таблица 3. Средние величины микробиологических показателей верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв при разных стадиях дигрессии

Показатель	Стадия дигрессии растительных сообществ		
	Д1 <i>n</i> = 10	Д2 <i>n</i> = 6	Д3 <i>n</i> = 9
Скорость БД, мкг СО ₂ –С/(г ч)	14.0 ± 1.3	13.9 ± 0.8	9.4 ± 0.7
Скорость СИД, мкг СО ₂ –С/(г ч)	119.4 ± 9.6	94.0 ± 4.2	55.2 ± 7.7
Содержание С _{мик} , мкг С/г почвы	2641 ± 212	2079 ± 93	1222 ± 170
Запас С _{мик} , г/м ²	473 ± 45	392 ± 41	310 ± 39
С _{мик} /С _{орг} , %	4.1 ± 0.8	3.2 ± 0.2	2.9 ± 0.2
Q _R = БД/СИД	0.12 ± 0.01	0.16 ± 0.02	0.20 ± 0.04
Содержание С _{орг} , %	8.47 ± 0.82	6.68 ± 0.52	3.70 ± 0.54

Примечание. Шкала оценки: 1. Содержание углерода микробной биомассы (мкг С/г почвы) в почвах: <200 – очень низкое; 201–500 – низкое; 501–1000 – среднее; >1000 – высокое [3]. 2. Степень нарушения устойчивости микробного сообщества почвы: коэффициент микробного дыхания (Q_R) – 0.1–0.2 – нарушение отсутствует; 0.2–0.3 – слабая; 0.3–0.5 – средняя; 0.5–1.0 – сильная; более 1.0 – катастрофическая [3, 6].

Таблица 4. Средние величины показателей ферментативной активности верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв при разных стадиях дигрессии

Фермент	Стадия дигрессии растительных сообществ		
	Д1 <i>n</i> = 10	Д2 <i>n</i> = 6	Д3 <i>n</i> = 9
Дегидрогеназа, мг ТФФ, 10 г/сут	5.6 ± 0.7	4.9 ± 1.2	3.5 ± 0.7
Каталаза, мг О ₂ /(г мин)	3.7 ± 0.3	3.0 ± 0.3	1.7 ± 0.2
Инвертаза, мг глюкозы/(г сут)	52.9 ± 6.3	51.0 ± 2.7	33.6 ± 5.0
Уреаза, мг NH ₃ , 10 г/сут	43.9 ± 8.1	43.9 ± 7.9	25.7 ± 6.7
Фосфатаза, мг Р ₂ О ₅ /(100 г ч)	74.7 ± 9.1	74.5 ± 8.9	49.0 ± 8.5

разной степени деградированных пастбищных (Д2 и Д3) экосистем отражены в табл. 2–4.

Физические, химические и физико-химические свойства почв. Представленные генетически устойчивые почвенные характеристики (табл. 2) определяют направленность и интенсивность протекания биохимических процессов, а также условия функционирования почвенных микроорганизмов [3, 9, 12].

Изученные почвы условно эталонных (Д1) и умеренно выпасаемых (Д2) лугов обладают сходными величинами pH_{KCl}. С увеличением степени дигрессии фитоценозов (Д3) наблюдается тенденция (*t* = 1.81; *P* = 0.09) к изменению исходной кислотности почв в сторону нейтральных значений. Установленные показатели pH характеризуют кислотно-щелочные условия изученных почв как достаточно благоприятные для активного функцио-

нирования бактериальной микробной биомассы и большинства почвенных ферментов.

Верхние горизонты (0–10 см) горных почв слабо- (Д1) и средненарушенных (Д2) лугов имеют рыхлое сложение вследствие обилия органических остатков травянистых растений, находящихся в разных стадиях разложения. Основной причиной, способствующей уплотнению высокогорных почв, является вытаптывание в процессе интенсивного выпаса скота [13, 29, 36]. Различие в средних значениях плотности между почвами условно эталонных (Д1) и умеренно нарушенных (Д2) фитоценозов незначительно ($t = 0.29$; $P = 0.78$). Под сильнообитым травостоем (Д3) описываемый показатель значимо выше, чем на слабо- (Д1) и средненарушенных (Д2) лугах, соответственно на 44 ($t = 4.91$; $P = 0.00$) и 30% ($t = 4.32$; $P = 0.00$). Известно, что уплотнение почв приводит к ухудшению их водно-воздушных свойств, нарушению температурного и питательного режимов [18, 27]. Происходящие изменения, в свою очередь, оказывают негативное влияние на интенсивность протекания биохимических и микробиологических процессов.

Отличительной чертой горных почв является высокое (6–10%) и очень высокое (>10%) содержание гумуса [18, 21, 29]. Обилие травянистой растительности и климатические условия субальпийского пояса способствуют накоплению большого количества органического вещества [21]. Проведенные исследования, согласно характеристике гумусового состояния почв по Гришиной, Орлову [14], подтверждают очень высокое содержание гумуса в верхних горизонтах (0–10 см) горных лугово-степных почв условно эталонных (Д1) и средненарушенных (Д2) луговых степей. Вследствие ежегодного стравливания животными надземной фитомассы на умеренно выпасаемых лугах (Д2) снижение содержания гумуса составляет 21% ($t = 1.56$; $P = 0.14$). Под влиянием перевыпаса (Д3) средние значения описываемого параметра почв значимо уменьшаются относительно данных, характеризующих условно эталонные (Д1) и средненарушенные (Д2) луга соответственно на 56 ($t = 4.72$; $P = 0.00$) и 44% ($t = 3.77$; $P = 0.00$).

В условиях умеренно выпасаемых луговых степей (Д2) прослеживается тенденция к потерям запасов гумуса на 18% ($t = 1.53$; $P = 0.15$). В то время как на сильнообитых пастбищах (Д3) выявлено значимое сокращение средних значений анализируемого параметра (на 37%; $t = 3.09$; $P = 0.00$) по сравнению с таковыми почв первой стадии дигрессии (Д1) и менее выраженное — второй стадии дигрессии (Д2) (на 23%; $t = 1.78$; $P = 0.09$). Существенное уменьшение содержания и запасов гумуса свидетельствует о наличии процессов дегумификации в горных лугово-степных почвах

пасторальных экосистем, что при продолжении столь же активного использования может привести к их дальнейшей деградации.

Микробиологические свойства почв. Респирационные параметры активности почвенных микроорганизмов: скорость базального и субстрат-индуцированного дыхания (БД и СИД) и их производные (содержание $C_{\text{мик}}$, запас $C_{\text{мик}}$, $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$, Q_R) — широко используются при оценке состояния естественных и антропогенно-нарушенных почв [3, 6, 20, 23, 33]. Их определение в горных почвах выявило снижение средних величин всех контролируемых микробных показателей на 17–54% по мере ухудшения состояния пастбищных экосистем (табл. 3).

Верхние горизонты исследуемых почв под условно эталонными (Д1) и средненарушенными (Д2) растительными сообществами обладают практически одинаковыми величинами скорости БД. Значимое снижение данного показателя (более чем на 30% по сравнению с (Д1)) наблюдается на сильнонарушенных пастбищах (Д3) ($t > 2.95$; $P = 0.00$).

Уменьшение скорости СИД, характеризующей физиологический потенциал микробной биомассы, проявляется в большей степени. Установленное различие между величинами СИД в почвах первой (Д1) и второй (Д2) стадий дигрессии не является значимым и составляет 21% ($t = 1.97$; $P = 0.07$), однако отмеченная тенденция усиливается при увеличении пастбищной нагрузки. При сравнении рассматриваемого параметра в почвах под сильнообитым травостоем (Д3) с соответствующими величинами условно эталонных (Д1) и средненарушенных (Д2) лугов наблюдается значимое различие, составляющее более 40% ($t > 3.84$; $P = 0.00$). Полученные данные указывают на снижение природного потенциала микробного пула в пастбищных почвах. Предполагаем, что уменьшение объема фитомассы и, как следствие, изменение количества органических остатков в сочетании с уплотнением пастбищных почв оказывает негативное влияние на деятельность микробных сообществ. В изученных почвах выявлена тесная сопряженная связь содержания гумуса со скоростью БД ($r = 0.76–0.84$) и СИД ($r = 0.94–0.95$). Аналогичные сведения о влиянии количества гумуса в горных почвах на величину реальной и потенциальной дыхательной активности отражены в работе [34].

Определение содержания углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) на основе данных скорости СИД [4, 19, 32] позволяет дать количественную оценку состояния микробного сообщества изученных почв. Согласно данным оценочной шкалы [3] почвы под условно эталонными (Д1) и средненарушенными (Д2) фитоценозами отнесены к категории с очень высоким уровнем данного показателя.

теля (>2500 мкг С/г), сильнонарушенных (Д3) — высоким (>1000 мкг С/г). Полученные данные, как и высокие значения содержания гумуса, обусловлены условиями почвообразования горных почв.

Устойчивое снижение этого микробного показателя при переходе от одной стадии дигрессии к другой (от 21 до 54%; $t = 1.97-5.15$; $P = 0.00-0.07$) указывает на неблагоприятные изменения, протекающие в микробных сообществах. Соответственно, имеет место и заметное уменьшение запасов $S_{\text{мик}}$, которое при сравнении данных, характеризующих почвы пастбищ первой (Д1) и третьей (Д3) стадий дигрессии, составляет 35% ($t = 2.71$; $P = 0.02$). Тем не менее, содержание $S_{\text{мик}}$, превышающее 1000 мкг С/г в почвах сильнодеградированных пастбищ (Д3) говорит о наличии достаточно большого количества микробной биомассы, способной активно участвовать в микробиологических процессах.

Это подтверждает и показатель доли углерода микробной биомассы в общем органическом углероде почвы $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$, который принято использовать в качестве индикатора устойчивости почв, находящихся в условиях антропогенного воздействия на биогеоценозы. Величина $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ обычно варьирует от 1 до 10% и чем больше его значение, тем устойчивее микробное сообщество [3]. Выявленные значения $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ уменьшаются несущественно с увеличением степени пастбищной дигрессии и укладываются в диапазон оптимальных величин, а обнаруженные различия не являются значимыми ($t < 0.64$; $P > 0.53$). Следовательно, состояние микробоценозов в почвах, подверженных даже высокому уровню пасторальной нагрузки (Д3), остается удовлетворительным.

Относительные коэффициенты микробного дыхания (Q_R) рассчитаны как показатель стресса микробоценозов субальпийских пастбищ. Чем меньше величина Q_R , тем более устойчива система почвенного микробного сообщества к различным воздействиям [3, 6]. Значения рассматриваемого параметра в почвах условно эталонных (Д1) и умеренно нарушенных (Д2) экосистем указывают на более высокую активность и устойчивость микробного пула по сравнению с почвами под сильно нарушенными низкотравными сообществами (Д3). Вместе с тем коэффициент Q_R в почвах сильнонарушенных пастбищ (Д3) еще укладывается в интервал оптимальных величин (0.1–0.2), что свидетельствует о способности почвенных микроорганизмов (благодаря высокому содержанию $S_{\text{мик}} > 1000$ мкг С/г) противостоять действию усиленного выпаса скота.

Биохимические свойства почв. Для характеристики биологической активности горных почв была изучена каталитическая деятельность фер-

ментов классов гидролаз (инвертаза, уреазы, фосфатаза) и оксидоредуктаз (дегидрогеназа, каталаза), отражающих интенсивность и направленность протекающих биохимических процессов [9, 18, 41]. Сравнительный анализ средних значений активности ферментов в верхних горизонтах исследуемых почв условно эталонных (Д1) и умеренно нарушенных (Д2) луговых биогеоценозов (табл. 4) с показателями шкалы [10] выявил высокий уровень активности инвертазы, уреазы и фосфатазы, средний — каталазы, слабый — дегидрогеназы. Согласно исследованиям авторов [9, 15, 18], горные почвы Кавказа в связи со значительным количеством органического вещества обладают высокой активностью гидролаз, тогда как каталитическое действие оксидоредуктаз подавлено. Данное обобщение согласуется с результатами настоящих и предыдущих исследований биологических свойств горных почв Центрально-го Кавказа [28, 30, 34, 36].

При умеренной пасторальной нагрузке (Д2) на почвенный покров гидролитические и окислительно-восстановительные ферменты сохраняют уровень активности в пределах градации, свойственной условно эталонным почвам (Д1). В результате активного использования пастбищ (Д3) наблюдается существенное снижение интенсивности действия анализируемых ферментов. Активность гидролаз изменяется от высокого уровня до среднего. Уменьшение абсолютных значений составляют для уреазы 42% ($t = 1.72$; $P = 0.10$) и фосфатазы 34% ($t = 2.05$; $P = 0.06$). Инвертаза проявляет значимое уменьшение величины активности, равное 37% ($t = 2.37$; $P = 0.03$). Как отмечают исследователи [2, 9, 15, 18], из группы гидролитических ферментов инвертаза наиболее зависима от содержания гумуса. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о сильной положительной связи между содержанием гумуса и активностью данного фермента ($r = 0.79-0.98$) в изученных горных почвах.

В почвах среденарушенных лугов (Д2) снижение активности оксидоредуктаз составляет 13–19% по сравнению с условно эталонными (Д1) и носит характер тенденции ($t < 1.89$; $P < 0.62$). В условиях сильнообитого травостоя (Д3) происходит более заметное ослабление каталитической деятельности данного класса ферментов по сравнению с гидролазами. Активность дегидрогеназы значимо уменьшается на 38% ($t = 2.13$; $P = 0.04$). Каталаза проявляет более существенное снижение абсолютных величин от среднего уровня до слабого (на 54%; $t = 5.76$; $P = 0.00$). Полученные данные соответствуют выводам других авторов [15, 18], установивших, что переуплотнение и изменение воздушного режима почв на перевыпасаемых пастбищах способствуют подавлению процессов окисления, которые приводят к значи-

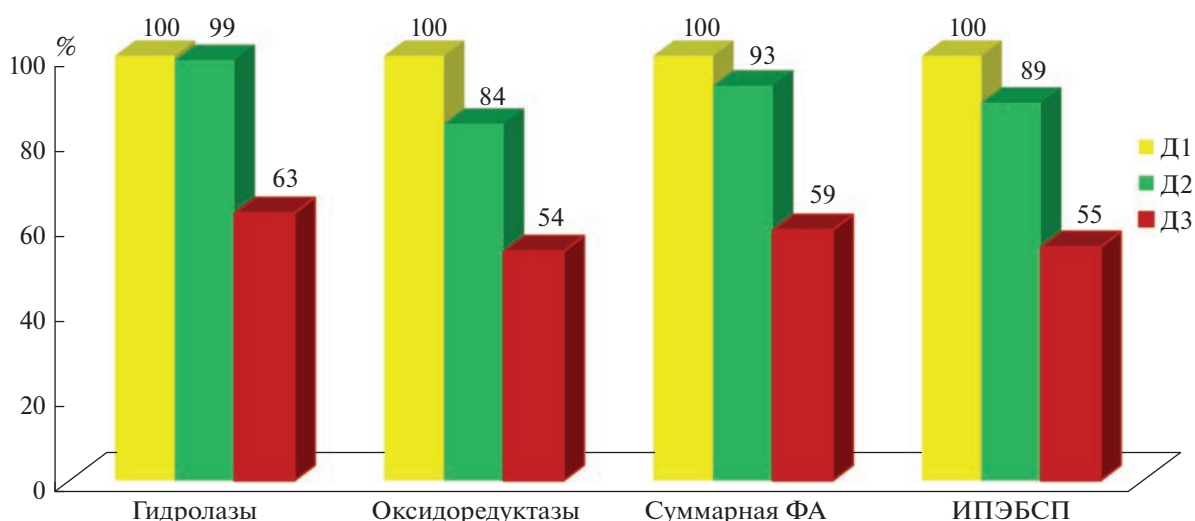


Рис. 4. Суммарная относительная активность гидролаз, оксидоредуктаз, ферментов двух классов и ИПЭБС верхних горизонтов (0–10 см) горных лугово-степных почв при разных стадиях пастбищной дигрессии.

тельному угнетению активности данного класса ферментов.

В целом изученные биохимические и микробиологические показатели свидетельствуют об ослаблении биологического состояния горных лугово-степных почв с увеличением степени дигрессии растительности — несущественное ($P > 0.05$) при умеренном выпасе скота и выраженное ($P < 0.05$) при интенсивном.

Для сравнительной оценки уровня общей активности ферментов почв, находящихся в условиях разной стадии дигрессии растительных сообществ, рассчитаны показатели суммарной относительной ферментативной активности гидролаз, оксидоредуктаз и пяти изученных ферментов. Диаграмма, представленная на рис. 4, демонстрирует изменение уровня суммарной активности контролируемых ферментов в почвах при разных стадиях пастбищной дигрессии.

Суммарная относительная активность гидролаз и оксидоредуктаз в почвах среднесбитых пастбищ (Д2) ниже показателей условно эталонных (Д1) на 1 и 16% соответственно. Как видно, гидролитические ферменты проявляют большую устойчивость к действию пастбищных нагрузок в отличие от окислительно-восстановительных. В условиях сильнонарушенных низкотравных сообществ (Д3) снижение уровня общей активности соответствующих групп ферментов проявляется намного заметнее — соответственно на 37 и 46%. Различия относительных величин суммарной ферментативной активности пяти изученных ферментов между почвами слаборазрушенных (Д1) и умеренно выпасаемых (Д2) лугов не превышает 7%. В то время как в условиях сильносбитых пастбищ (Д3) наблюдается более существенное

сокращение суммарной активности ферментов (на 41%).

Для определения общего уровня биологической активности исследуемых почв использовали методику расчета интегрального показателя эколого-биологического состояния (ИПЭБСП, %), эффективность использования которой была доказана при изучении равнинных и горных почв Центрального Кавказа [11, 12, 34]. Представленные значения ИПЭБСП, характеризующие общий уровень биологической активности, суммируют следующие биологические параметры: содержание гумуса и углерода микробной биомассы, активность гидролитических (инвертаза, фосфатаза, уреазы) и окислительно-восстановительных (дегидрогеназа, каталаза) ферментов. В почвах умеренно выпасаемых пастбищ (Д2) по сравнению с условным эталоном (Д1) уменьшение величины характеризуемого показателя на 11% указывает на постепенные процессы деградации, проявляющиеся на уровне тенденции. Выявленное существенное снижение ИПЭБСП перевыпасаемых луговых степей (Д3) на 45% обусловлено их длительным и активным пастбищным использованием и свидетельствует о протекании выраженных деградиационных процессов в почвенном покрове пастбищных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных комплексных исследований физико-химических и биологических свойств горных лугово-степных почв Центрального Кавказа в пределах Кабардино-Балкарии (Баксанское ущелье) дана характеристика их современного состояния при разных уровнях дигрессии фитоценозов.

Анализ полученных данных свидетельствует, что по мере увеличения интенсивности выпаса в пастбищных экосистемах происходят изменения контролируемых показателей. Снижение большинства биологических параметров (на 4–25%; $P > 0.05$) в верхних горизонтах (0–10 см) почв умеренно выпасаемых (Д2) остепненных лугов по сравнению с наиболее сохранившимися (Д1) носит характер тенденции. С увеличением степени дигрессии луговой растительности (Д3) наблюдаются значительные изменения изученных показателей (на 35–56%; $P < 0.05$), отражающие существенную деградацию пастбищных лугово-степных почв, что подтверждается снижением общего уровня биологической активности, выраженного в падении ИПЭБСП на 45%.

Проведенные исследования подтверждают необходимость продолжения мониторинга состояния горно-луговых экосистем Центрального Кавказа. Полученные сведения указывают на целесообразность и эффективность использования биологических показателей для оценки влияния различной степени пастбищной нагрузки на горные почвы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НЦМУ “Агротехнологии будущего”, проект № 075-15-2022-322.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601268>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авессаломова И.А., Петрушина М.Н., Хорошев А.В. Горные ландшафты: структура и динамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 158 с.
2. Азаренко (Мясникова) М.А., Казеев К.Ш., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1412–1422.
3. Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.
4. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.
5. Берущашивили Н.Л. Методика ландшафтно-геофизических исследований и картографирования состояний природно-территориальных комплексов. Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1983. 200 с.
6. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346.
7. Борисов А.В., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Пинской В.Н., Плеханова Л.Н., Идрисов И.А. Почвы древних земледельческих террас Восточного Кавказа // Почвоведение. 2021. № 5. С. 542–557.
8. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Методология исследований биологической активности почв // Научная мысль Кавказа. 1999. № 1. С. 32–37.
9. Галстян А.Ш. Ферментативная активность почв Армении. Ереван: Изд-во Айастан, 1974. 275 с.
10. Гапонюк Э.И., Малахов С.В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Тр. 4-го Всесоюз. совещ. Обнинск, июнь 1983. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 3–10.
11. Гедгафова Ф.В., Улигова Т.С., Горобцова О.Н., Темботов Р.Х. Биологическая активность черноземных почв Центрального Кавказа (в пределах терского варианта поясности Кабардино-Балкарии) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1474–1482.
12. Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 1. С. 1–15. <https://doi.org/10.31857/S0024114821010046>
13. Грачева Р.Г., Белоновская Е.А. Современное состояние пасторальных экосистем Центрального Кавказа // Известия РАН. Сер. Географическая. 2010. № 1. С. 90–102.
14. Гришина Л.А., Орлов Д.С. Система показателей гумусового состояния почв // Проблемы почвоведения. М., 1978. С. 42–47.
15. Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние пастбищной нагрузки на ферментативную активность лесных почв Северо-Западного Кавказа // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2. С. 345–348.
16. Добровольский В.В. Практикум по географии почв. М.: Владос, 2001. 143 с.
17. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федер. ун-та, 2012. 260 с.
18. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во ЦВВР, 2004. 350 с.
19. Ковалев И.В., Семенов В.М., Ковалева Н.О., Лебедева Т.Н., Яковлева В.М., Паутова Н.Б. Оценка биогенности и биоактивности агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв // Почвоведение. 2021. № 7. С. 827–837.
20. Курганова И.Н., Телесина В.М., Лопес Де Гереню В.О., Личко В.И., Овсепян Л.А. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности

- агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 825–842.
21. Молчанов Э.Н. Горные лугово-степные почвы высокогорий Восточного Кавказа // Почвоведение. 2009. № 6. С. 638–647.
 22. Молчанов Э.Н. Почвенный покров Кабардино-Балкарской АССР. Пояснительный текст к Почвенной карте Кабардино-Балкарской АССР. М.: ГУГК при СМ СССР, 1990. 22 с.
 23. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтowa Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243.
 24. Пинской В.Н., Идрисов И.А., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Потапова А.В., Борисов А.В. Влияние экспозиции склона на химические и биологические свойства почв земледельческих террас восточного Кавказа // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28. № 2. С. 113–121.
<https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-2-113-121>
 25. Почвы Кабардино-Балкарской АССР и рекомендации по их использованию. Нальчик: СевКав-НИИгипрозем, 1984. 201 с.
 26. Ромашкевич А.И., Яшина А.В., Борунов А.К. Особенности структур почвенного и растительного покрова северного склона Центрального Кавказа // Почвоведение. 1985. № 5. С. 32–42.
 27. Русанов А.М. Гумусное состояние южных черноземов под естественными пастбищами // Почвоведение. 1993. № 11. С. 25–30.
 28. Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Горобцова О.Н., Цепкова Н.Л., Рапопорт И.Б., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Луговые биогеоценозы субальпийского пояса Кабардино-Балкарского Государственного высокогорного заповедника (Центральный Кавказ) // Исследования в области охраны природы. Заповедная наука. 2019. Т. 4. № 2. С. 29–47.
<https://doi.org/10.24189/ncr.2019.012>
 29. Фиатишев Б.Х. Высокогорные почвы центральной части Северного Кавказа. Нальчик: Изд-во КБГСХА, 1996. 137 с.
 30. Хакунова Е.М., Горобцова О.Н., Гедгафова Ф.В., Улигова Т.С., Темботов Р.Х. Изменение биологической активности горных черноземов Центрального Кавказа в результате сельскохозяйственного использования (в границах эльбрусского варианта поясности Кабардино-Балкарии) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 12–18.
<https://doi.org/10.7868/S000218811803002X>
 31. Цепкова Н.Л., Фисун М.Н. Горные пастбища Кабардино-Балкарии. Нальчик: Изд-во КБГСХА, 2005. 35 с.
 32. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A Physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
 33. Bardelli T., Gomez-Brandon M., Ascher-Jenull J., Fornasier F., Arfaioli P., Francioli D., Egli M., Sartori G., Insam H., Pietramellara G. Effects of slope exposure on soil Physico-chemical and microbiological Properties along an altitudinal climosequence in the Italian ALPS // Sci. Total Environ. 2017. V. 1. P. 1041–1055.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.176>
 34. Gedgafova F.V., Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Tsepkova N.L., Tembotov R.Kh., Khakunova E.M. Assessment of biological activity in mountain chernozems and mountain-meadow chernozemic soils of natural biogeocenoses in the Central Caucasus, Russia // Euras. J. Soil Sci. 2022. V. 11. № 1. P. 77–85.
<https://doi.org/10.18393/ejss.996603>
 35. Gilmullina A., RumPelc C., Blagodatskaya E., Chabbi A. Management of grasslands by mowing versus grazing – impacts on soil organic matter quality and microbial functioning // Appl. Soil Ecol. 2020. V. 156. P. 103701.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103701>
 36. Gorobtsova O.N., Chadaeva V.A., Gedgafova F.V., Uligova T.S., Tembotov R.Kh., Khakunova E.M. The current state of mountain meadow soils of subalpine Pasture ecosystems of the Central Caucasus (elbrus altitudinal zonal-ity) // BIO Web of Conferences. 2021. V. 35(00009).
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20213500009>
 37. Ivashchenko K.V., Sushko S.V., Selezneva A.E., Ananyeva N.D., Zhuravleva A.I., Kudayarov V.N., Makarov M.I., Blagodatsky S.A. Soil microbial activity along an altitudinal gradient: Vegetation as a main driver beyond topographic and edaphic factors // Appl. Soil Ecology. 2021. V. 168. P. 104197.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.104197>
 38. Murugan R., Loges R., Taube F., Sradnick A., Joergensen R.G. Changes in soil microbial biomass and residual indices as ecological indicators of land use change in temperate permanent grassland // Microb. Ecol. 2014. V. 67. P. 907–918.
<https://doi.org/10.1007/s00248-014-0383-8>
 39. Qasim S., Gul S., Hussain M. Sh., Fayyaz H., Sarfraz A., Muhammad I.A., Gulbano R., Muhammad Y., Shah Q.S. Influence of grazing enclosure on vegetation biomass and soil quality // Int. Soil Water Conserv. Res. 2017. V. 5. № 1. P. 62–68.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.004>
 40. Reyes-Ortigoza A.L. Características de la actividad enzimática y el humus en suelos de chinampa // Characteristics of enzymatic activity and humus in chinampa soil. 2019. V. 37. № 4. P. 339–349.
<https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.487>
 41. Utobo E.B., Tewari L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status // Appl Ecology. Environ. Res. 2015. V. 13/1. 147–169.
https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169
 42. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2014. 181 p.
 43. Zhang X., Zahng W., Sai X., Chun F., Li X., Lu X., Wang H. Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a stipa kirschii steppe of Inner Mongolia // Soil Till. Res. 2022. V. 219. P. 105327.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105327>

Assessment of Changes in the Biological Activity of Mountain Meadow-Steppe Soils of Pastures of Different Stages of Digression in the Central Caucasus

F. V. Gedgafova¹, O. N. Gorobtsova¹, T. S. Uligova¹, N. L. Tsepkova¹, E. M. Khakunova¹,
K. Kh. Daova¹, and R. Kh. Tembotov^{1, 2, *}

¹*Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories, Russian Academy of Sciences, Nalchik, 360051 Russia*

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

**e-mail: ecology_lab@mail.ru*

The indicators of biological activity (humus content and reserves, microbial biomass carbon content and reserves, activity of hydrolase and oxidoreductase class enzymes) in the upper horizons (0–10 cm) of mountain meadow-steppe soils of the Central Caucasus (Kabardino-Balkaria) were determined at different stages of pasture digression (D1, D2, D3). It was found that the values of controlled soil parameters in conditions of weakly (D1) and moderately disturbed (D2) meadow phytocenoses did not significantly differ ($t < 1.97$; $P > 0.05$). Statistically significant decreases ($t > 2.95$; $P < 0.05$) in biological parameters were revealed in soils of severely disturbed meadow steppes (D3) compared with less damaged meadows (D1 and D2). Based on the totality of the studied indicators of biological activity, an integral indicator of the ecological and biological state of soils (IEBSS) is calculated, reflecting the overall level of biological activity of the studied soils at different stages of digression of meadow-steppe communities. There was a decrease in the IEBSS of moderately grazed (D2) and overgrazed (D3) meadows relative to the values of the conditional standard (D1) by 11 and 45%, respectively. The obtained results of the biological state of mountain meadow-steppe soils are used for monitoring studies aimed at assessing the degree of change in the soil and vegetation cover of mountain pasture ecosystems.

Keywords: subalpine meadows, pastures, humus, microbial biomass carbon, enzyme activity, Mollic Leptosols Eutric