







DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240721>

EDN: <https://elibrary.ru/yqyrvj>

УДК 543.632.42: 502.2 (470.67)

Научная статья

Вариабельность запасов органического углерода в почвах и растительности Внутригорного Дагестана

Ш.К. Салихов^{1*} , М.А. Яхияев¹ , И.М. Абдулагатов^{2, 3} ,
М.М. Маллалиев⁴ 

¹ Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, 367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45

² Дагестанский государственный университет, 367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43а

³ Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики РАН, 367030, Россия, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, д. 39а

⁴ Горный ботанический сад ДФИЦ РАН, 367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45

*salichov72@mail.ru

Аннотация. Дана оценка взаимосвязи между почвенно-климатическими различиями и накоплением запасов почвенного органического углерода ($C_{орг}$) в почвенном покрове орографически замкнутой межгорной зоны на склонах разной экспозиции хребтов Дуцнабек и Чакулабек (Восточный Кавказ). Исследование проведено в районе Внутригорного Дагестана (1100–1250 м н.у.м.) на участках экспериментальной базы «Цудахарская» ГорБС ДФИЦ РАН в условиях заповедного режима. Работа по выявлению накопления $C_{орг}$ в почвах проводилась на южном аридном (горная лугово-степная почва) и северном гумидном (горная лугово-лесная почва) склонах территории. Проективное покрытие южного склона (Дуцнабек) по сравнению с северным (Чакулабек) было ниже на 10%, видовая насыщенность – ниже на 36 единиц. Содержание $C_{орг}$ в почвенном слое толщиной 40 см колебалось в пределах 1.42–2.11%, при этом на южном склоне запас органического углерода был на 45.23% ниже, чем на северном. Также на южном склоне наблюдалось меньшее накопление фитомассы: на 48.40% в зеленой массе и 65.28% в корневой. Были обнаружены значимые коррелятивные связи по шкале Чеддока между запасами углерода и показателями продуктивности фитоценоза с физическими свойствами почвы: прямая связь с влажностью и обратная – с плотностью и температурой.

Ключевые слова: горные экосистемы, фитоценоз, флористический состав, видовая насыщенность, аридизация климата, почвенно-климатические факторы, гумус, корреляция

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного проекта «Динамика почвенного покрова и биопродуктивности экосистем Северо-Западного Прикаспия и Восточного Кавказа» (проект № АААА-А20-120062990014-2).

Благодарности. Работа выполнена с использованием УНУ "Система экспериментальных баз, расположенных вдоль высотного градиента" ФГБУН Горного ботанического сада Дагестанского научного центра Российской академии наук (УНУ СЭБ ГорБС ДНЦ РАН). Авторы благодарны Р.А. Муртазалиеву – к.б.н., в.н.с., зав. лаб. почвенных и растительных ресурсов ПИБР ДФИЦ РАН за помощь в определении видового состава фитоценозов.

ORCID:

Ш.К. Салихов, <https://orcid.org/0000-0001-5531-3045>

М.А. Яхияев, <https://orcid.org/0000-0002-9955-5019>

И.М. Абдулагатов, <https://orcid.org/0000-0002-6299-5280>

М.М. Маллалиев, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2976>

Для цитирования: Салихов, Ш.К. и др., 2026. Вариабельность запасов органического углерода в почвах и растительности Внутригорного Дагестана. *Трансформация экосистем* 9 (1), 30–47. <https://doi.org/10.23859/estr-240721>

Поступила в редакцию: 21.07.2024

Принята к печати: 12.12.2024

Опубликована онлайн: 13.02.2026





DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240721>

EDN: <https://elibrary.ru/yqyrvj>

UDC 543.632.42: 502.2 (470.67)

Article

Variability of organic carbon stocks in soils and vegetation of the Highland (Inner Mountainous) Dagestan

Sh.K. Salikhov^{1*} , M.A. Yakhiaev¹ , I.M. Abdulagatov^{2, 3} ,
M.M. Mallaliev⁴ 

¹ *Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhiev St. 45, Makhachkala, 367000 Russia*

² *Dagestan State University, M. Gadzhiev St. 43a, Makhachkala, 367000 Russia*

³ *Institute of Geothermal Problems and Renewable Energy, Russian Academy of Sciences, I. Shamil Prospect St. 39a., Makhachkala, 367030 Russia*

⁴ *Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhiev St. 45, Makhachkala, 367000 Russia*

*salichov72@mail.ru

Abstract. This study evaluates the relationship between soil-climatic differences and the accumulation of soil organic carbon (C_{org}) stocks in the soil cover of an orographically enclosed intermountain zone on slopes of contrasting exposure within the Dutsnabek and Chakulabek mountain ranges (Eastern Caucasus). The research was conducted at the "Tsudakhar" experimental site of the Mountain Botanical

Garden, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences (1100–1250 m a.s.l.), under a protected (reserve) regime. C_{org} accumulation was analyzed on the arid southern slope (mountain meadow-steppe soil) and the humid northern slope (mountain meadow-forest soil). Vegetation cover on the southern slope (Dutsnabek) was 10% lower, and species richness was 36 units lower compared to the northern slope (Chakulabek). C_{org} content in the top 40 cm soil layer ranged from 1.42% to 2.11%, with organic carbon stocks on the southern slope being 45.23% lower than on the northern slope. Additionally, the southern slope exhibited significantly lower biomass accumulation: 48.40% less in green biomass and 65.28% less in root biomass. Significant correlations (according to Chedoke scale) were found between C_{org} stocks and vegetation productivity indicators as well as soil physical properties: positive correlations with soil moisture and negative correlations with bulk density and temperature.

Keywords: mountain ecosystems, phytocenosis, floristic composition, species richness, climate aridization, soil-climatic factors, humus, correlation

Funding. This study was carried out within the framework of the state project “Dynamics of soil cover and biodiversity of ecosystems in the North-Western Caspian and Eastern Caucasus” (Project No. AAAA-A20-120062990014-2).

Acknowledgements. The research was conducted using the Unique Scientific Infrastructure “System of experimental stations along the altitudinal gradient” of the Mountain Botanical Garden, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences (USI SEB MBG DSC RAS). The authors thank R.A. Murtazaliev, PhD, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Soil and Plant Resources, PIBR DFRC RAS, for assistance in identifying the phytocenosis species composition.

ORCID:

Sh.K. Salikhov, <https://orcid.org/0000-0001-5531-3045>

M.A. Yakhiaev, <https://orcid.org/0000-0002-9955-5019>

I.M. Abdulatov, <https://orcid.org/0000-0002-6299-5280>

M.M. Mallaliev, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2976>

To cite this article: Salikhov, Sh.K. et al., 2026. Variability of organic carbon stocks in soils and vegetation of the Highland (Inner Mountainous) Dagestan. *Ecosystem Transformation* 9 (1), 30–47. <https://doi.org/10.23859/estr-240721>

Received: 21.07.2024

Accepted: 12.12.2024

Published online: 13.02.2026

Введение

Управление сельским хозяйством влечет за собой ряд экологических проблем, включая истощение запасов органического углерода (C_{org}) почв и выбросы парниковых газов (Bossio et al., 2020). Контроль над сохранением C_{org} важен для экосистемных процессов (круговорота углерода в наземных экосистемах), поскольку углерод влияет на состав атмосферы и скорость изменения климата. Известно, что незначительное изменение содержания углерода в почве может оказать существенное воздействие на концентрацию CO_2 в атмосфере, что приведет к негативным последствиям для наземных экосистем (Bradford et al., 2016). Кроме того, сохранение C_{org} играет ключевую роль в повышении плодородия почвы и контроле сельскохозяйственного производства (Gerke, 2022).

Изменение климата и связанные с этим методы ведения сельского хозяйства (подбор культур, применение органических удобрений, ирригация, лесомелиорация, севооборот) влияют на физико-химические и биологические свойства почвы в условиях интенсивного земледелия (Jia et al., 2022; Skadell et al., 2023). Таким образом, наше понимание распределения C_{org} способов контроля

его изменений и влияния различных факторов на его сохранение позволяет положительно влиять на окружающую среду. Потепление климата приводит к потере запасов $C_{\text{орг}}$ (Dong et al., 2021). Изменения в почве сказываются на темпах накопления и потери почвенного углерода (Lal, 2004).

Точная оценка накопления $C_{\text{орг}}$ важна для измерения поглощения углерода наземными экосистемами и позволяет отслеживать изменения скорости его накопления в результате антропогенной деятельности (сельского хозяйства, урбанизации, индустриализации и добычи полезных ископаемых и т.д.) или изменения климата. Увеличение запасов $C_{\text{орг}}$ в наземных экосистемах является одним из наиболее эффективных и экономичных подходов к замедлению роста концентрации CO_2 в атмосфере (Anjum et al., 2022).

Территория России составляет около 10% площади суши Земли, и в ее почвенном покрове сосредоточена почти пятая часть мировых запасов почвенного углерода. Основой при разработке почвенных карт служат данные из почвенных разрезов, характеризующие содержание органического углерода (De Anta et al., 2020; Mirchooli et al., 2020). Поэтому достоверная оценка запаса углерода в почвах России и его распределения по территории является чрезвычайно актуальной проблемой.

Запасы $C_{\text{орг}}$ в природных экосистемах России оценивались несколькими исследователями на основе типичных параметров почвенного профиля (Абакумов и др., 2022; Чернова и др., 2021) или с использованием усредненных значений $C_{\text{орг}}$ из базы данных (Chestnykh et al., 2022; Husniev et al., 2020). В подобных работах распределение $C_{\text{орг}}$ в почвах анализировалось на основе нескольких вариантов районирования: экологического (Adhikari et al., 2020; Zhou et al., 2021), административного (Чернова и др., 2021) и лесного (De Anta et al., 2020).

Важно отметить, что накопление углерода в природных системах зависит от продуктивности травяных экосистем и почвенно-климатических условий. Таким образом, информация о накоплениях $C_{\text{орг}}$, его природной динамике и отслеживание изменений состояния его запасов в нетронутых охраняемых экосистемах конкретных регионов даст основу для прогнозирования трансформаций, происходящих при изменении климатических условий и вовлечении природных экосистем в сельскохозяйственное использование.

Цель настоящего исследования – анализ взаимосвязи почвенно-климатических различий и накопления $C_{\text{орг}}$ в почвенно-растительном покрове на участках южной и северной экспозиции склонов межгорной зоны Республики Дагестан (Восточный Кавказ, юг России). Представленные данные могут быть использованы для улучшения или проверки достоверности моделей прогнозирования запасов $C_{\text{орг}}$, например, геостатистической модели (Yigini and Panagos, 2016).

Материалы и методы

Исследование содержания и запасов органического углерода почв проведено в районе внутригорного (межгорного) Дагестана (1100–1250 м н.у.м.). Две постоянные пробные площади (ППП) по 100 м² были заложены на экспериментальной базе «Цудахарская» Горного ботанического сада (ГорБС ДФИЦ РАН) в условиях заповедного режима со следующими координатами GPS: северный склон хребта Чакулабек – N 42.327640 E 47.166180, южный склон хребта Дуцнабек – N 42.328297 E 47.164353 (Рис. 1).

Полевой эксперимент проводился в летние месяцы 2012–2021 гг. На ППП определялись, средние показатели продуктивности фитоценозов и почвенно-климатических характеристик за 10-летний период. Описания ППП проводили в период наибольшего сезонного разнообразия флоры – в августе каждого года с 2012 по 2021 гг. Флористический состав на этих площадках был зафиксирован в августе 2021 г.

Названия почв даны в соответствии с классификацией почв СССР (Егоров и др., 1977) с учетом региональных особенностей (Диагностика..., 1982; Залибеков, 2010).

Почвенный покров Внутригорного Дагестана в общих чертах характеризуется маломощностью и щебнистостью почвенного профиля, каменистостью почв и большой степенью подверженности водной склоновой эрозии. Механический состав почв преимущественно среднесуглинистый. Содержание гумуса в почвах в зависимости от типовых различий и степени подверженности их водной эрозии варьирует в пределах от 1.5 до 12%. Реакция почвенной среды (pH) колеблется от нейтральной (горные лугово-степные почвы) до слабокислой и кислой (горные лугово-лесные почвы).

Почва северного склона – горная лугово-лесная карбонатная маломощная, эродированная тяжелосуглинистая на делювиальных карбонатных отложениях. Почвы подобного типа в почвенном покрове Дагестана слабо изучены из-за ограниченности и прерывистости ареала. Площадь их со-



Рис. 1. Карта расположения исследованных участков Цудахарского стационара.

ставляет всего 27.8 тыс. га (0.6%) общей территории Дагестана. Для этих почв отмечается темно-окрашенный цвет горизонта А с постепенным уменьшением его интенсивности вниз по профилю.

Почва южного склона – горная лугово-степная на карбонатных отложениях, сильно эродированная тяжелосуглинистая на делювиальных плотных известняковых отложениях. Подобные почвы в земельном фонде Дагестана занимают 127.4 тыс. га. Горные лугово-степные почвы приурочены к участкам рельефа с недостаточным увлажнением и испаряемостью, превышающей сумму осадков. В основном для лугово-степных почв характерен тяжелосуглинистый, обычно иловато-пылеватый механический состав. Особенностью морфологического строения почвенного профиля данных почв, кроме скелетности, является незначительная мощность почвенных горизонтов А+В, равная 30–40 см.

Для выявления запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$) почв образцы отбирались с корнеобитаемых почвенных слоев 0–20 и 20–40 см согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017¹. Выбор глубин обусловлен тем, что в круговороте $C_{\text{орг}}$ слой почвы толщиной 0–40 см ответственен за быстрые изменения условий окружающей среды (Wan et al., 2019; Zhong et al., 2021). Точность оценки содержания $C_{\text{орг}}$ сильно зависит от определения плотности почвы (Xu et al., 2015). В настоящей работе плотность почвы измерялась согласно РД 52.33.219², исходя из объема, определенного по результатам отбора проб.

Предполагая, что все входные параметры (M , R и H) в рабочем уравнении для определения плотности независимы, дисперсия плотности (d) равна

$$u^2(d) = \left(\frac{\partial d}{\partial M} \right)_{R,H} u^2(M) + \left(\frac{\partial d}{\partial R} \right)_{M,H} u^2(R) + \left(\frac{\partial d}{\partial H} \right)_{M,R} u^2(H),$$

где $u(H)$ и $u(M)$ – стандартные погрешности независимых измеряемых параметров (M , R и H);

$\left(\frac{\partial d}{\partial M} \right)_{R,H}$, $\left(\frac{\partial d}{\partial R} \right)_{M,H}$ и $\left(\frac{\partial d}{\partial H} \right)_{M,R}$ – коэффициент чувствительности для плотности, который

можно легко рассчитать из рабочего уравнения $d = M / (\pi R^2 H)$ путем дифференцирования.

Суммарная стандартная неопределенность представляет собой квадратный корень из отклонения $u^2(d)$ ³. Относительная суммарная расширенная неопределенность $U_r(d)$ измерения плотности (d) с уровнем достоверности 0.95 может быть рассчитана с помощью следующего простого уравнения ($k = 2$ – коэффициент включения). Таким образом, совокупная расширенная относительная неопределенность измерений плотности почвы (при доверительном уровне 0.95, коэффициенте охвата $k = 2$) была оценена как $U_r(d) = k u_r(d) = 1.0\%$.

Углерод в пробах определялся по методу Тюрина (ФАО, 2021) путем окисления органического вещества смесью $H_2SO_4 + K_2Cr_2O_7$ и последующего определения с помощью фотоэлектрического концентрационного колориметра КФК-2МП (Россия, АООТ "Загорский оптико-механический завод", Сергиев Посад, Россия). Зеленую массу определяли укосным методом, корневую массу определяли в эти же сроки, на тех же учетных площадках, после скашивания зеленой массы, до глубины 40 см методом монолитов (Базилевич и др., 1978).

Во всех разрезах на ППП определена плотность почвы на глубинах 0–20 и 20–40 см в трехкратной повторности. На основе изучения профильного $C_{\text{орг}}$ и плотности почвы были рассчитаны их индивидуальные запасы для разных слоев почв и суммарный органический углерод в почвенной толще 0–40 см.

Суммарная расширенная относительная погрешность (уровень достоверности 0.95, $k = 2$) определения содержания $C_{\text{орг}}$ оценивается в 1%.

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

² РД 52.33.219–2022. Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы.

³ Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Интернет-ресурс. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6 (дата обращения: 25.11.2024).

Запасы $C_{\text{орг}}$ в почве были рассчитаны следующим образом (Yigini and Panagos, 2016):

$$Q = (m \times h \times d) \times 1000,$$

где Q – запас $C_{\text{орг}}$, кг/га; m – содержание $C_{\text{орг}}$, %; h – глубина отбора проб, см; d – объемная плотность слоя почвы, г/см³. Совокупная расширенная относительная неопределенность (уровень достоверности 0.95, $k = 2$) при определении запасов $C_{\text{орг}}$ оценивается в 2%.

Содержание углерода в фитомассе определено титрованием 0.2 н раствором соли Мора (Третьяков и др., 1990).

Запасы углерода ($C_{\text{зап}}$) в фитомассе были определены по формуле

$$C_{\text{зап}} = P \times C_{\%},$$

где P – продуктивность фитомассы, кг/га; $C_{\%}$ – содержание углерода в фитомассе, %.

Все анализы выполнены в 3-х кратной повторности. Результаты представлены в виде средних значений и их стандартных отклонений. Статистические анализы результатов были выполнены с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.0 (StatSoft Inc, США). Критический уровень статистической значимости был принят за $p \leq 0.05$. Нормальность дисперсии была проверена с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Связь показателей физических свойств почв с запасом углерода в почвах и продуктивностью фитоценоза была определена с помощью коэффициента корреляции по Пирсону. Сила и направление линейной связи между количественными переменными (показателями физических свойств почв, запаса углерода в почвах, продуктивности фитоценоза) оценивались с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Качественная интерпретация полученных значений коэффициента проведена на основе шкалы Чеддока (Кремер, 2009), где теснота связи классифицируется как слабая (0.10–0.29), умеренная (0.30–0.49), заметная (0.50–0.69), высокая (0.70–0.89) и весьма высокая (0.90–1.00).

Результаты и обсуждение

ППП, расположенные на участках северных и южных склонов хребтов Чакулабек и Дуцнабек, отличались по геоморфологическим, климатическим и флористическим характеристикам (Табл. 1).

По сравнению с северным склоном хребта средняя освещенность на южном склоне в 14–15 часов дня за 10-летний период была выше на 7714 люкс, что привело к более сильному нагреву этого склона: температура почвы здесь на 8°C выше. Крутизна южного склона также в два раза

Табл. 1. Характеристика участков Цудахарского стационара (2012–2021 гг.), $n = 10$.

| Параметры полигон-трансекты | Экспозиция склона | |
|--|-------------------|--------------|
| | Северный склон | Южный склон |
| Высота н.у.м., м | 1160 | 1130 |
| Освещенность, люкс | 80824 ± 2332 | 88538 ± 2510 |
| Крутизна склона, ° | 17 | 33 |
| на поверхности | 25.4 ± 1.29 | 33.5 ± 1.31 |
| Температура почвы, °C | 0–20 см | 24.1 ± 2.51 |
| | 20–40 см | 21.2 ± 2.21 |
| Высота травостоя, см | 25 ± 1.33 | 35 ± 1.51 |
| Проективное покрытие травянистого яруса, % | 95 | 85 |

выше, вследствие чего наблюдалась сильная эрозия. Проективное покрытие растительности на северном склоне плотнее, чем на южном. Это связано с тем, что после таяния снега влага здесь дольше сохраняется из-за плохого прогрева почвы в весенне-летний период.

Высота травостоя на северном склоне ниже, чем на южном. Разная экспозиция склонов приводит к появлению различных типов растительности (Zapata-Rios et al., 2016), отличающихся видовым разнообразием (Yang et al., 2020). Видовой состав изученных нами фитоценозов был представлен 97 видами, из которых на северном склоне произрастало 74 вида, а на южном – 38 видов (Табл. 2).

Растительность в целом на северном склоне хребта Чакулабек шибляково-фриганоидная, а на южном склоне хребта Дуцнабек – полупустынно-степная (Маллалиев и Асадулаев, 2014).

Древесно-кустарниковая растительность на южном склоне представлена очень слабо. Древесная полностью отсутствует, а из кустарников встречаются *Ephedra procera* и *Onobrychis cornuta*. На северном склоне из древесных видов произрастают *Armeniaca vulgaris*, *Pinus kochiana* и *Malus orientalis*. Кустарниковая растительность представлена 9 видами, из которых доминантом является *Rosa spinosissima*. Из 13 видов древесно-кустарниковой растительности, представленных на двух участках разной экспозиции, только *Onobrychis cornuta* является общим для обоих склонов, что является очень низким показателем сходства по Жаккару (7.7%).

Травянистая растительность характеризуется явно выраженным доминантом на обоих склонах – *Bothriochloa ischaemum* (8% покрытия на северном и 29.5% на южном), который является общедревнесредиземноморским гемикриптофитом и типичным представителем флоры Внутригорного Дагестана. На южном склоне из основных доминантов можно еще выделить *Achnatherum caragana* (16%) и *Onobrychis bobrovii* (7.3%). Далее идут *Gypsophila acutifolia*, *Salvia canescens*, *Stipa pennata*, *Jurinea ruprechtii*, *Elytrigia gracillima*, *Potentilla bifurca* и др. Северный склон, в отличие от южного, не имеет явно выраженного доминантного вида и характеризуется группой доминантов (*Bothriochloa ischaemum*, *Salvia canescens*, *Festuca woronowii*, *Inula hirta*, *Carex humilis* и *Fragaria viridis*), проективное покрытие каждого из которых составляет от 3.5 до 8%. Из 84 видов травянистой растительности общими для обоих склонов являются 10 видов.

В целом коэффициент флористического сходства Жаккара (Kj) между склонами разной экспозиции (северная и южная) составил 0.11, что является очень низким показателем. Такие значительные различия флористического состава территорий на небольшой отдаленности друг от друга обусловлены различием экологических факторов, определяющих тип растительности. К основным таким факторам относятся экспозиция склона, субстрат, температурный режим, крутизна и биотическая разобщенность склонов.

На исследуемой территории выявлены следующие растительные ассоциации: на северном склоне **Rosetum varioherbosum**, а на южном – **Bothriochloso-achnatheretum**.

На северном склоне произрастали тенелюбивые и влаголюбивые растения. Влага здесь сохраняется длительное время и активно используется растениями для роста и развития. На южном склоне под влиянием достаточно высоких температур с низкой влажностью и высокой испаряемостью растения быстро высыхают.

Насыщенность видами на 100 м² на южном склоне исследуемой территории ниже на 36 единиц. Проективное покрытие растений на южном склоне менее уплотненное (на 10%), что обусловлено более быстрым и долгим прогревом почвы, а также более высокой крутизной склона, вызывающей эрозию.

В слое 0–40 см разных типов почв Цудахарского стационара наблюдались различные показатели плотности, влажности, содержания и запасов C_{орг} (Табл. 3).

В среднем за 10-летний период плотность горных лугово-лесных почв была меньше плотности горных лугово-степных на 0.1 и 0.3 г/см³ в слоях 0–20 и 20–40 см соответственно.

Аридизация на участке южного склона территории Цудахарского стационара привела к уменьшению почвенной влажности в слое 0–40 см на 22.10% по сравнению с участком северного склона. Представленные данные указывают на различие процессов эрозии и накопления влаги на склонах с различной экспозицией.

Известно, что в степях и лесостепях из-за неравномерного таяния снега на «теплых» склонах южной и западной экспозиций скорость эрозионных процессов значительно выше, чем на «холодных» северных (Кирейчева и Шевченко, 2020). Это приводит к снижению продуктивности экосистем, что тесно связано с запасами C_{орг}. Кроме того, южные склоны быстрее оттаивают и дольше остаются незащищенными, что увеличивает риск эрозионно-опасных процессов на этих

Табл. 2. Флористический состав полярных экспозиций участков Цудахарского стационара (Внутригорный Дагестан) в 2021 г.; «+» – единственный вид, «–» – вид не обнаружен.

| № | Вид | Проективное покрытие, % | |
|----|--|-------------------------|-------------|
| | | Северный склон | Южный склон |
| | Древесный ярус в целом | 3 | 0 |
| 1 | <i>Armeniaca vulgaris</i> Lam. | 1 | – |
| 2 | <i>Malus orientalis</i> Uglitzk. | 1.5 | – |
| 3 | <i>Pinus kochiana</i> Klotzsch | 0.5 | – |
| | Кустарниковый ярус в целом | 15 | 2 |
| 4 | <i>Berberis vulgaris</i> L. | 1 | – |
| 5 | <i>Cotoneaster integerrimus</i> Medik. | 0.5 | – |
| 6 | <i>Ephedra procera</i> Fisch. & C.A. Mey. | – | + |
| 7 | <i>Juniperus oblonga</i> M. Bieb. | 1 | – |
| 8 | <i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv. | 1 | 2 |
| 9 | <i>Rhamnus cathartica</i> L. | 1.5 | – |
| 10 | <i>Rhamnus tortuosa</i> Sommier & Levier | 0.7 | – |
| 11 | <i>Rosa canina</i> L. | 1.5 | – |
| 12 | <i>Rosa spinosissima</i> L. | 6.3 | – |
| 13 | <i>Spiraea hypericifolia</i> L. | 1.5 | – |
| | Травянистый ярус в целом | 95 | 85 |
| 14 | <i>Achillea millefolium</i> L. | 1.1 | – |
| 15 | <i>Achnatherum caragana</i> (Trin.) Nevski | – | 16 |
| 16 | <i>Achnatherum virescens</i> (Trin.) Banfi, Galasso & Bartolucci | 0.6 | – |
| 17 | <i>Alchemilla sericata</i> Rchb. ex Buser | 0.8 | – |
| 18 | <i>Allium gunibicum</i> Misch. ex Grossh. | – | 0.4 |
| 19 | <i>Androsace villosa</i> L. | 0.4 | – |
| 20 | <i>Anthemis fruticulosa</i> M. Bieb. | 1 | – |
| 21 | <i>Artemisia armeniaca</i> Lam. | – | 2.2 |
| 22 | <i>Artemisia salsoloides</i> Willd | – | + |
| 23 | <i>Aster amelloides</i> Besser | 0.5 | – |
| 24 | <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng | 8 | 29.5 |
| 25 | <i>Bromopsis biebersteinii</i> (Roem. & Schult.) Holub | 1.6 | – |
| 26 | <i>Bupleurum polyphyllum</i> Ledeb. | 0.2 | – |
| 27 | <i>Campanula hohenackeri</i> Fisch. & C.A. Mey. | 0.2 | + |
| 28 | <i>Carex humilis</i> Leyss. | 3.5 | – |
| 29 | <i>Carlina vulgaris</i> L. | 0.4 | – |
| 30 | <i>Cichorium intybus</i> L. | – | 0.2 |

| № | Вид | Проективное покрытие, % | |
|----|--|-------------------------|-------------|
| | | Северный склон | Южный склон |
| 31 | <i>Cirsium argillosum</i> Petrov ex Kharadze | – | 0.3 |
| 32 | <i>Dianthus caucaseus</i> Sm. | 0.3 | – |
| 33 | <i>Diploaxis muralis</i> (L.) DC. | – | 0.4 |
| 34 | <i>Echium russicum</i> J.F. Gmel. | + | – |
| 35 | <i>Echium vulgare</i> L. | – | + |
| 36 | <i>Elytrigia gracillima</i> (Nevski) Nevski | 4.3 | 2.2 |
| 37 | <i>Erigeron acris</i> L. | + | – |
| 38 | <i>Erysimum meyerianum</i> (Rupr.) N. Busch | – | 0.5 |
| 39 | <i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit. | 0.5 | 1.4 |
| 40 | <i>Euphrasia pectinata</i> Ten. | 0.8 | – |
| 41 | <i>Festuca woronowii</i> Hack. | 5.5 | – |
| 42 | <i>Filipendula vulgaris</i> Moench | 2.8 | – |
| 43 | <i>Fragaria viridis</i> Weston | 4.9 | – |
| 44 | <i>Galium humifusum</i> M. Bieb. | – | 1.2 |
| 45 | <i>Galium valantioides</i> M. Bieb. | 0.2 | – |
| 46 | <i>Gypsophila acutifolia</i> Fisch. ex Spreng. | – | 5.5 |
| 47 | <i>Gypsophila tenuifolia</i> M. Bieb. | 0.6 | – |
| 48 | <i>Helianthemum dagestanicum</i> Rupr. | 0.8 | – |
| 49 | <i>Helianthemum nummularium</i> (L.) Mill. | 1.7 | – |
| 50 | <i>Hypericum perforatum</i> L. | 2.2 | – |
| 51 | <i>Inula britannica</i> L. | – | 0.6 |
| 52 | <i>Inula germanica</i> L. | 0.4 | – |
| 53 | <i>Inula hirta</i> L. | 5.8 | – |
| 54 | <i>Jurinea ruprechtii</i> Boiss. | – | 3.2 |
| 55 | <i>Koeleria macrantha</i> (Ledeb.) Schult. | 2.8 | – |
| 56 | <i>Lactuca serriola</i> L. | – | 0.6 |
| 57 | <i>Leontodon hispidus</i> L. | 0.7 | – |
| 58 | <i>Linum austriacum</i> L. | + | – |
| 59 | <i>Linum tauricum</i> Willd. | – | 0.8 |
| 60 | <i>Medicago falcata</i> L. | 2.6 | 0.9 |
| 61 | <i>Melampyrum arvense</i> L. | 0.9 | – |
| 62 | <i>Melica transsilvanica</i> Schur | – | 1.7 |
| 63 | <i>Minuartia oreina</i> (Mattf.) Schischk. | 0.2 | – |
| 64 | <i>Onobrychis bobrovii</i> Grossh. | – | 7.3 |
| 65 | <i>Peucedanum ruthenicum</i> M. Bieb. | 0.3 | – |
| 66 | <i>Phlomis tuberosa</i> (L.) Moench | 0.6 | – |

| № | Вид | Проективное покрытие, % | |
|----|---|-------------------------|-------------|
| | | Северный склон | Южный склон |
| 67 | <i>Pilosella officinarum</i> F.W. Schultz & Sch. Bip. | 0.7 | – |
| 68 | <i>Pimpinella saxifraga</i> L. | 0.4 | – |
| 69 | <i>Plantago lanceolata</i> L. | 1 | 0.5 |
| 70 | <i>Plantago major</i> L. | – | + |
| 71 | <i>Plantago media</i> L. | 0.5 | – |
| 72 | <i>Poa pratensis</i> L. | 2.7 | – |
| 73 | <i>Potentilla bifurca</i> L. | – | 1.8 |
| 74 | <i>Potentilla crantzii</i> (Crantz) Beck ex Fritsch | 0.8 | 0.3 |
| 75 | <i>Potentilla recta</i> L. | + | – |
| 76 | <i>Psephellus daghestanicus</i> Sosn. | 2 | – |
| 77 | <i>Pseudomuscari pallens</i> (M. Bieb.) Garbari | 0.3 | – |
| 78 | <i>Pulsatilla albana</i> (Steven) Bercht. & J. Presl | 0.5 | – |
| 79 | <i>Reseda lutea</i> L. | – | 1.2 |
| 80 | <i>Salvia canescens</i> C.A. Mey. | 7.2 | 1.9 |
| 81 | <i>Salvia verticillata</i> L. | 2.6 | – |
| 82 | <i>Satureja subdentata</i> Boiss. | 2.1 | – |
| 83 | <i>Scabiosa gumbetica</i> Boiss. | 2.2 | – |
| 84 | <i>Securigera varia</i> (L.) Lassen | 2.8 | – |
| 85 | <i>Silene longipetala</i> Vent. | 0.8 | – |
| 86 | <i>Sonchus oleraceus</i> L. | – | + |
| 87 | <i>Stipa caucasica</i> Schmalh. | 3.3 | – |
| 88 | <i>Stipa daghestanica</i> Grossh. | 2.2 | – |
| 89 | <i>Stipa pennata</i> L. | – | 3.1 |
| 90 | <i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg. | 0.3 | + |
| 91 | <i>Teucrium chamaedrys</i> L. | 0.9 | – |
| 92 | <i>Teucrium polium</i> L. | 1.8 | 1.1 |
| 93 | <i>Thalictrum foetidum</i> L. | 0.9 | – |
| 94 | <i>Thymus collinus</i> M. Bieb. | 0.8 | – |
| 95 | <i>Vincetoxicum funebre</i> Boiss. & Kotschy | 0.4 | – |
| 96 | <i>Vincetoxicum scandens</i> Sommier & Levier | 0.3 | – |
| 97 | <i>Ziziphora acinos</i> (L.) Melnikov | 0.2 | – |

Табл. 3. Содержание органического углерода в почвах Цудахарского стационара (Внутригорный Дагестан) в 2012–2021 гг., n – 10.

| Тип почвы, склон, высота н.у.м. | Глубина, см | Плотность, г/см ³ | Влажность почвы, % | C _{орг} , % | Запасы, т/га |
|---|-------------|------------------------------|--------------------|----------------------|--------------|
| Горная лугово-лесная, северный склон, 1160 м н.у.м. | 0–20 | 1.07 ± 0.04 | 19.11 ± 1.14 | 2.58 ± 0.18 | 55.23 ± 2.09 |
| | 20–40 | 1.15 ± 0.04 | 17.68 ± 1.06 | 1.63 ± 0.11 | 37.44 ± 1.39 |
| Горная лугово-степная, южный склон, 1130 м н.у.м. | 0–20 | 1.08 ± 0.03 | 13.24 ± 1.19 | 1.69 ± 0.05 | 36.58 ± 1.30 |
| | 20–40 | 1.18 ± 0.03 | 16.89 ± 1.52 | 1.15 ± 0.03 | 27.23 ± 0.91 |

склонах из-за вероятности дождевого стока. Однако при отсутствии эрозионных процессов в условиях заповедного режима продуктивность фитоценозов, произрастающих на северных склонах, не всегда выше, чем на южных (Гасанов и др., 2016). В связи с этим следует количественно оценить различия в продуктивности фитомассы и запасов C_{орг} на склонах различной экспозиции.

Неравномерность рельефа горной зоны влияет на перераспределение солнечной радиации, что существенно влияет на микроклимат (температуру воздуха и почвы) (Burnett et al., 2008), свойства почвы (содержание органических веществ, химические свойства) (Lozano-García et al., 2015). В почвах Цудахарского стационара, в условиях заповедного режима, содержание C_{орг} в почвенной толще 0–40 см варьировало в пределах 1.42–2.11% (Табл. 3). Запас на участке южного склона был на 28.86 т/га меньше. Таким образом, максимальные запасы C_{орг} сосредоточены в горной лугово-лесной почве.

Осенняя растительная масса возвращается в почву, где разлагается с образованием гумуса. Однако процесс вымывания растительной массы вследствие эрозии на южных склонах препятствует образованию большого гумусового слоя. По этой причине горные лугово-степные почвы бедны C_{орг} и не очень плодородны по сравнению с горной лугово-лесной почвой северного склона.

Травяные экосистемы распространены во всех природно-климатических зонах, характеризуясь широким разнообразием ботанического состава и плотности травостоя, почвенно-экологическими условиями произрастания, что обуславливает значительную вариабельность их продуктивности. Продукция травяных экосистем определяется и лимитируется многими факторами: флористическим составом, водным режимом, обеспеченностью питательными веществами, длительностью вегетационного сезона (Broderick et al., 2022; Waheed et al., 2022). В нашем полевом опыте продуктивность фитоценозов Внутригорного Дагестана зависела от типа почвы, экспозиции склона, гипсометрической отметки (Табл. 4) и обусловленных ими физических свойств почвы (Табл. 3).

Фитоценоз, сформированный на горной лугово-степной почве южного склона, накапливал меньше воздушно-сухой массы: его продуктивность по сравнению с фитоценозом на горной лугово-лесной почве северного склона была ниже на 48.40% в зеленой массе и на 65.28% в корневой.

При анализе связи показателей физических свойств почв с запасом C_{орг} в почве и показателями продуктивности фитоценоза (зеленая масса, корневая масса) по шкале Чеддока была обнаружена значимая высокая прямая коррелятивная связь с влажностью и заметная высокая обратная связь с плотностью и температурой (Табл. 5).

Табл. 4. Чистая первичная продукция фитоценозов Цудахарского стационара (Внутригорный Дагестан) в 2012–2021 гг., $n = 10$.

| Тип почвы, склон, высота н.у.м. | Зеленая масса, ц/га | Корневая масса, ц/га |
|--|---------------------|----------------------|
| Горная лугово-лесная, северный склон, 1160 м н.у.м. | 27.35 ± 1.11 | 163.1 ± 4.15 |
| Горная лугово-степная, южный склон, 1130 м н.у.м. | 18.43 ± 1.51 | 98.68 ± 6.38 |

Табл. 5. Связь показателей физических свойств почв с запасом $C_{орг}$ в почвах и продуктивностью фитоценоза в 2012–2021 гг. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при $\alpha = 0.05$.

| Физические свойства почвы | Запас органического углерода в почве | Зеленая масса | Корневая масса |
|------------------------------|---|---------------|----------------|
| Северный склон | | | |
| Температура почвы | -0.815 | -0.827 | -0.580 |
| Плотность почвы | -0.672 | -0.713 | -0.906 |
| Влажность почвы | 0.707 | 0.709 | 0.606 |
| Южный склон | | | |
| Температура почвы | -0.857 | -0.834 | -0.773 |
| Плотность почвы | -0.475 | -0.758 | -0.739 |
| Влажность почвы | 0.821 | 0.850 | 0.852 |

Выводы

1) Физические свойства исследованных склоновых почв различались: плотность горной лугово-лесной почвы (северный склон) по сравнению с горной лугово-степной (южный склон) в среднем за 10-летний период была меньше на 0.1–0.3 г/см³, влажность выше на 22.10%.

2) Вследствие почвенно-климатических различий запас $C_{орг}$ в почве северного склона был выше в 1.5 раза.

3) Флористическое разнообразие северного склона было выше на 36 видов, коэффициент Жаккара между склонами северной и южной экспозиций составил 0.11.

4) Вследствие аридизации на участке южной экспозиции уменьшилась продуктивность фитоценоза – на 48.40% и 65.28% в зеленой и корневой массе соответственно.

5) Установлена прямая связь накопления $C_{орг}$ в почве и продуктивности фитоценоза с влажностью и обратная корреляция с плотностью и температурой почвы.

6) Полученные результаты могут быть использованы для реализации проектов рационального управления продукционными и деструкционными процессами в природных и агроландшафтах. Они могут служить основой для дистанционного зондирования продуктивности ландшафтов.

Список литературы

- Абакумов, Е.В., Поляков, В.И., Чуков, С.Н., 2022. Подходы и методы изучения органического вещества почв углеродных полигонов России. *Почвоведение* 55 (7), 773–786.
- Базилевич, Н.И., Титлянова, А.А., Смирнов, В.В., Родин, Л.Е., Нечаева, Н.Т., Левин, Ф.И., 1978. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. Мысль, Москва, СССР, 183 с.
- Гасанов, Г.Н., Салихов, Ш.К., Гаджиев, К.М., Маллалиев, М.М., Шайхалова, Ж.О., Гимбатова, К.Б., 2016. Видовой состав и продуктивность луговых фитоценозов горы Маяк (Гунибское плато, республика Дагестан). *Растительные ресурсы* 52 (2), 214–224.
- Диагностика и классификация почв Дагестана, 1982. Издательство Дагестанского филиала Академии наук СССР, Махачкала, СССР, 84 с.
- Егоров, В.В., Фридланд, В.М., Иванова, Е.Н., Розов, Н.Н., Носин, В.А., Фриев, Т.А., 1997. Классификация и диагностика почв СССР. Колос, Москва, Россия, 221 с.
- Залибеков, З.Г., 2010. Почвы Дагестана. ПИБР ДНЦ РАН, Махачкала, Россия, 243 с.
- Кирейчева, Л.В., Шевченко, В.А., 2020. Состояние пахотных земель Нечерноземной зоны Российской Федерации и основные направления повышения плодородия почв. *Международный сельскохозяйственный журнал* 2, 12–16.
- Кремер, Н.Ш., 2009. Теория вероятностей и математическая статистика. ЮНИТИ-ДАНА, Москва, Россия, 551 с.
- Маллалиев, М.М., Асадулаев, З.М., 2014. Соляные и эдафические особенности дифференциации парциальных флор Внутреннегорного Дагестана. *Тезисы докладов 10-ой международной школы-семинара по сравнительной флористике «Сравнительная флористика: анализ видового разнообразия растений. Проблемы. Перспективы»*. Краснодар, Россия, 186–187.
- Третьяков, Н.Н., Карнаухова, Т.В., Паничкин, Л.А., 1990. Практикум по физиологии растений. Агропромиздат, Москва, Россия, 271 с.
- ФАО, 2021. Стандартная рабочая процедура для определения органического углерода в почве. Спектрофотометрический метод Тюрина. Электронный ресурс. URL: <https://www.fao.org/3/cb4757ru/cb4757ru.pdf> (дата обращения: 25.11.2024).
- Чернова, О.В., Голозубов, О.М., Алябина, И.О., Щепаченко, Д.Г., 2021. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России. *Почвоведение* 3, 273–286.
- Adhikari, K., Mishra, U., Owens, P.R., Libohova, Z., Wills, S.A. et al., 2020. Importance and strength of environmental controllers of soil organic carbon changes with scale. *Geoderma* 375, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114472>
- Anjum, J., Sheikh, M.A., Tiwari, A., Sharma, S., Kumari, B., 2022. Carbon sequestration: an Approach to sustainable environment. In: Malik, J.A. (ed.), *Microbial and Biotechnological Interventions in Bioremediation and Phytoremediation*. Springer, Cham, Germany, 425–444. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08830-8_18
- Bossio, D.A., Cook-Patton, S.C., Ellis, P.W., Fargione, J., Sanderman, J. et al., 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability* 3 (5), 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>

- Bradford, M.A., Wieder, W.R., Bonan, G.B., Fierer, N., Raymond, P.A., 2016. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change* **6** (8), 751–758. <https://doi.org/10.1038/nclimate3071>
- Broderick, C.M., Wilkins, K., Smith, M.D., Blair, J.M., 2022. Climate legacies determine grassland responses to future rainfall regimes. *Global Change Biology* **28** (8), 2639–2656. <https://doi.org/10.1111/gcb.16084>
- Burnett, B.N., Meyer, G.A., McFadden, L.D., 2008. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **113**, F03002. <https://doi.org/10.1029/2007jf000789>
- Chestnykh, O.V., Grabovskiy, V.I., Zamolodchikov, D.G., 2022. Estimate of the soil carbon stock of forested regions in Russia using databases of soil properties. *Contemporary Problems of Ecology* **15**, 731–740. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070071>
- De Anta, R.C., Luís, E., Febrero-Bande, M., Galíñanes, J., Macías, F., Ortíz, R., Casás, F., 2020. Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma* **370**, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
- Dong, X., Liu, C., Ma, D., Wu, Y., Man, H. et al., 2021. Organic carbon mineralization and bacterial community of active layer soils response to short-term warming in the Great Hing'an Mountains of Northeast China. *Frontiers in Microbiology* **12**, 802213. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.802213>
- Gerke, J., 2022. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems* **6** (2), 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
- Husniev, I., Romanenkov, V., Minakova, O., Krasilnikov, P., 2020. Modelling and prediction of organic carbon dynamics in arable soils based on a 62-year field experiment in the Voronezh region, European Russia. *Agronomy* **10** (10), 1607. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101607>
- Jia, R., Zhou, J., Chu, J.C., Shahbaz, M., Yang, Y.D. et al., 2022. Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: A case study from the North China plain. *Journal of Cleaner Production* **362**, 132265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132265>
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* **304** (5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lozano-García, B., Parras-Alcántara, L., Brevik, E.C., 2016. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of The Total Environment* **544**, 963–970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.022>
- Mirchooli, F., Kiani-Harchegani, M., Darvishan, A.K., Falahatkar, S., Sadeghi, S.H., 2020. Spatial distribution dependency of soil organic carbon content to important environmental variables. *Ecological Indicators* **116**, 106473. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106473>
- Skadell, L.E., Schneider, F., Gocke, M.I., Guigue, J., Amelung, W. et al., 2023. Twenty percent of agricultural management effects on organic carbon stocks occur in subsoils—results of ten long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **356**, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108619>
- Waheed, M., Haq, S.M., Arshad, F., Bussmann, R.W., Iqbal, M., Bukhari, N.A., Hatamleh, A.A., 2022. Grasses in semi-arid lowlands – community composition and spatial dynamics with special regard to the influence of edaphic factors. *Sustainability* **14** (22), 14964. <https://doi.org/10.3390/su142214964>

- Wan, Q., Zhu, G., Guo, H., Zhang, Y., Pan, H., Yong, L., Ma, H., 2019. Influence of vegetation coverage and climate environment on soil organic carbon in the Qilian Mountains. *Scientific reports* 9 (1), 17623. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53837-4>
- Xu, L., He, N.P., Yu, G.R., Wen, D., Gao, Y., He, H.L., 2015. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: Evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120 (8): 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>
- Yang, J., El-Kassaby, Y.A., Guan, W., 2020. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. *Scientific Reports* 10, 16465 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73496-0>
- Yigini, Y., Panagos, P., 2016. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of The Total Environment* 557–558, 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>
- Zapata-Rios, X., Brooks, P.D., Troch, P.A., McIntosh, J., Guo, Q., 2016. Influence of terrain aspect on water partitioning, vegetation structure and vegetation greening in high-elevation catchments in northern New Mexico. *Ecohydrology* 9, 782–795. <https://doi.org/10.1002/eco.1674>
- Zhong, Z., Wu, S., Lu, X., Ren, Z., Wu, Q. et al., 2021. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China. *Catena* 196, 104867. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104867>
- Zhou, Y., Chen, S., Zhu, A.X., Hu, B., Shi, Z., Li, Y., 2021. Revealing the scale-and location-specific controlling factors of soil organic carbon in Tibet. *Geoderma* 382, 114713. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114713>

References

- Abakumov, E.V., Polyakov, V.I. Chukov, S.N., 2022. Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (Review). *Eurasian Soil Science* 55, 849–860.
- Adhikari, K., Mishra, U., Owens, P.R., Libohova, Z., Wills, S.A. et al., 2020. Importance and strength of environmental controllers of soil organic carbon changes with scale. *Geoderma* 375, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114472>
- Anjum, J., Sheikh, M.A., Tiwari, A., Sharma, S., Kumari, B., 2022. Carbon sequestration: an Approach to sustainable environment. In: Malik, J.A. (ed.), *Microbial and Biotechnological Interventions in Bioremediation and Phytoremediation*. Springer, Cham, Germany, 425–444. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08830-8_18
- Bazilevich, N.I., Titlyanova, A.A., Smirnov, V.V., Rodin, L.E., Nechaeva, N.T., Levin, F.I., 1978. Metody izucheniia biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh [Methods of studying the biological cycle in various natural areas]. Mysl, Moscow, USSR, 183 p. (In Russian).
- Bossio, D.A., Cook-Patton, S.C., Ellis, P.W., Fargione, J., Sanderman, J. et al., 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability* 3 (5), 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Bradford, M.A., Wieder, W.R., Bonan, G.B., Fierer, N., Raymond, P.A., 2016. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change* 6 (8), 751–758. <https://doi.org/10.1038/nclimate3071>
- Broderick, C.M., Wilkins, K., Smith, M.D., Blair, J.M., 2022. Climate legacies determine grassland responses to future rainfall regimes. *Global Change Biology* 28 (8), 2639–2656. <https://doi.org/10.1111/gcb.16084>

- Burnett, B.N., Meyer, G.A., McFadden, L.D., 2008. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **113**, F03002. <https://doi.org/10.1029/2007jf000789>
- Chernova, O.V., Golozubov, O.M., Alyabina, I.O., Schepaschenko, D.G., 2021. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation. *Eurasian Soil Science* **54** (3), 325–336. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>
- Chestnykh, O.V., Grabovskiy, V.I., Zamolodchikov, D.G., 2022. Estimate of the soil carbon stock of forested regions in Russia using databases of soil properties. *Contemporary Problems of Ecology* **15**, 731–740. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070071>
- De Anta, R.C., Luís, E., Febrero-Bande, M., Galíñanes, J., Macías, F., Ortíz, R., Casás, F., 2020. Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma* **370**, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
- Diagnostika i klassifikatsiia pochv Dagestana [Diagnostics and classification of soils of Dagestan], 1982. Publishing house of the Dagestan Branch of the Academy of Sciences of the USSR, Makhachkala, USSR, 84 p. (In Russian).
- Dong, X., Liu, C., Ma, D., Wu, Y., Man, H. et al., 2021. Organic carbon mineralization and bacterial community of active layer soils response to short-term warming in the Great Hing'an Mountains of Northeast China. *Frontiers in Microbiology* **12**, 802213. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.802213>
- Egorov, V.V., Friedland, V.M. Ivanova, E.N., Pink, N.N., Nosin, V.A., Friev, T.A., 1977. Klassifikatsiia i diagnostika pochv SSSR [Classification and diagnosis of soil USSR]. Kolos, Moscow, USSR, 221 p. (In Russian).
- FAO, 2021. Standartnaia rabochaia protsedura dlia opredeleniia organicheskogo ugleroda v pochve. Spektrofotometricheskii metod Tiurina [Standard operating procedure for the determination of organic carbon in soil. The Tyurin spectrophotometric method]. Web page. URL: <https://www.fao.org/3/cb4757ru/cb4757ru.pdf> (accessed: 25.11.2024). (In Russian).
- Gasanov, G.N., Salikhov, Sh.K., Gadzhiev, K.M., Mallaliev, M.M., Shayhalova, Zh.O., Gimbatova, K.B., 2016. Vidovoi sostav i produktivnost' lugovykh fitotsenozov gory Maiak (Gunibskoe plato, respublika Dagestan) [Species composition and productivity of meadow plant communities of Mayak mountain (Gunib plateau, Dagestan)]. *Rastitel'nye resursy [Plant Resources]* **52** (2), 214–224. (In Russian).
- Gerke, J., 2022. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems* **6** (2), 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
- Husniev, I., Romanenkov, V., Minakova, O., Krasilnikov, P., 2020. Modelling and prediction of organic carbon dynamics in arable soils based on a 62-year field experiment in the Voronezh region, European Russia. *Agronomy* **10** (10), 1607. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101607>
- Jia, R., Zhou, J., Chu, J.C., Shahbaz, M., Yang, Y.D. et al., 2022. Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: A case study from the North China plain. *Journal of Cleaner Production* **362**, 132265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132265>
- Kireycheva, L.V., Shevchenko, V.A., 2020. Sostoianie pakhotnykh zemel' Nechernozemnoi zony Rossiiskoi Federatsii i osnovnye napravleniia povysheniia plodorodiia pochv [The status of the arable land in the Non-Chernozem zone of the Russian Federation and the main directions of soil fertility improvement]. *Mezhdunarodnyi sel'skokhoziaistvennyi zhurnal [International Agricultural Journal]* **2**, 12–16. (In Russian).
- Kremer, N.S., 2009. Teoriia veroiatnostei i matematicheskaiia statistika [Probability theory and mathematical statistics]. UNITY-DANA, Moscow, Russia, 551 p. (In Russian).
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* **304** (5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

- Lozano-García, B., Parras-Alcántara, L., Brevik, E.C., 2016. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of The Total Environment* **544**, 963–970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.022>
- Mallaliev, M.M., Asadulaev, Z.M., 2014. Soliarnye i edaficheskie osobennosti differentsiatsii partial'nykh flor Vnutrennegornogo Dagestana [Solar and edaphic features of differentiation of partial floras of Inland Dagestan], 2014. *Tezisy dokladov 10-oi mezhdunarodnoi shkoly-seminara po sravnitel'noi floristike «Sravnitel'naia floristika: analiz vidovogo raznoobraziia rastenii. Problemy. Perspektivy» [Abstracts of the 10th International School-seminar on comparative floristics "Comparative floristics: analysis of plant species diversity. Problems. Prospects"]*. Krasnodar, Russia, 186–187. (In Russian).
- Mirchooli, F., Kiani-Harchegani, M., Darvishan, A.K., Falahatkar, S., Sadeghi, S.H., 2020. Spatial distribution dependency of soil organic carbon content to important environmental variables. *Ecological Indicators* **116**, 106473. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106473>
- Skadell, L.E., Schneider, F., Gocke, M.I., Guigue, J., Amelung, W. et al., 2023. Twenty percent of agricultural management effects on organic carbon stocks occur in subsoils—results of ten long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **356**, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108619>
- Tretyakov, N.N., Karnaukhova, T.V., Panichkin, L.A., 1990. Praktikum po fiziologii rastenii [Workshop on plant physiology]. Agropromizdat, Moscow, Russia, 271 p. (In Russian).
- Waheed, M., Haq, S.M., Arshad, F., Bussmann, R.W., Iqbal, M., Bukhari, N.A., Hatamleh, A.A., 2022. Grasses in semi-arid lowlands – community composition and spatial dynamics with special regard to the influence of edaphic factors. *Sustainability* **14** (22), 14964. <https://doi.org/10.3390/su142214964>
- Wan, Q., Zhu, G., Guo, H., Zhang, Y., Pan, H., Yong, L., Ma, H., 2019. Influence of vegetation coverage and climate environment on soil organic carbon in the Qilian Mountains. *Scientific reports* **9** (1), 17623. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53837-4>
- Xu, L, He, N.P., Yu, G.R., Wen, D, Gao, Y., He, H.L., 2015. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: Evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **120** (8): 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>
- Yang, J., El-Kassaby, Y.A., Guan, W., 2020. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. *Scientific Reports* **10**, 16465 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73496-0>
- Yigini, Y., Panagos, P., 2016. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of The Total Environment* **557–558**, 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>
- Zalibekov, Z.G., 2010. Pochvy Dagestana [Soils of Dagestan]. Caspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia, 243 p. (In Russian).
- Zapata-Rios, X., Brooks, P.D., Troch, P.A., McIntosh, J., Guo, Q., 2016. Influence of terrain aspect on water partitioning, vegetation structure and vegetation greening in high-elevation catchments in northern New Mexico. *Ecohydrology* **9**, 782–795. <https://doi.org/10.1002/eco.1674>
- Zhong, Z., Wu, S., Lu, X., Ren, Z., Wu, Q. et al., 2021. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China. *Catena* **196**, 104867. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104867>
- Zhou, Y., Chen, S., Zhu, A.X., Hu, B., Shi, Z., Li, Y., 2021. Revealing the scale-and location-specific controlling factors of soil organic carbon in Tibet. *Geoderma* **382**, 114713. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114713>