

Оригинальная статья / Original article

УДК 911.5.6

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-17



Сезонные состояния и динамика углерода на ключевых участках Карбонового полигона в Чеченской Республике

Алексей Н. Гуня^{1,3}, Умар Т. Гайрабеков^{2,3}, Любовь Ш. Махмудова³, Зульфира Ш. Гагаева^{2,3}¹Институт географии РАН, Москва, Россия²Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия³Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

Контактное лицо

Умар Т. Гайрабеков, доктор географических наук, доцент, Институт природных ресурсов Академии наук Чеченской Республики; 364051 Россия, г. Грозный, ул. В. Алиева, 19а.
Тел. +79287812988

Email gairabekov_u@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-6358-0477>

Формат цитирования

Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Гагаева З.Ш. Сезонные состояния и динамика углерода на ключевых участках Карбонового полигона в Чеченской Республике // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 3. С. 169-179.
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-17

Получена 12 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 24 мая 2024 г.

Принята 25 июня 2024 г.

Резюме

Цель – проанализировать связь динамики углерода и смены состояний природно-территориальных комплексов двух ключевых участков карбонового полигона в Чеченской Республике с позиций ландшафтного и ландшафтно-геофизического подхода. Работы проводились на двух участках карбонового полигона Чеченской Республики: в Черноречье (Чеченская равнина под водоохранными широколиственными лесами, 169 м н. у. м.) и Рошни-Чу (широколиственно-лесные низкогорья, около 450 м н.у.м.).

Методы исследования: ландшафтно-геофизическое описание геомасс, геогоризонтов и вертикальных структур на ключевых участках, детальные микроклиматические исследования с помощью установленных логгеров – датчиков температуры и влажности, наблюдения за состоянием растительного покрова, динамикой биомассы, определение фракций мортмассы на поверхности почвы, а также гумуса и основных питательных веществ.

Связь динамики углерода и смены состояний ПТК исследуемых участков выражается в изменении ландшафтно-геофизических параметров: соотношения геомасс, геогоризонтов и вертикальных структур. Выделены семь сезонных состояний ПТК, отличающихся по динамике углерода. Два из них являются ключевыми к пониманию долгосрочного баланса углерода. Эти состояния обусловлены динамикой накопления и разложения мортмассы. Выделены пути изменения интенсивности депонирования углерода на основе создания новых фитоценозов, улучшения почвенного плодородия, в том числе за счет оптимизации соотношения углерода и азота. Более радикальный путь – утилизации мортмассы – нуждается в детальных исследованиях и учета экологических последствий.

Ключевые слова

Состояние ПТК, вертикальная структура, баланс углерода, геомасса, геогоризонт, фитомасса, мортмасса.

Seasonal states and carbon dynamics in key areas of the carbon polygon in the Chechen Republic, Russia

Alexey N. Gunya^{1,3}, Umar T. Gayrabekov^{2,3}, Lyubov Sh. Makhmudova³ and Zulfira Sh. Gagaeva^{2,3}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russia

³Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

Principal contact

Umar T. Gairabekov, Doctor of GeographyS,
Associate Professor, Institute of Natural Resources,
Academy of Sciences of the Chechen Republic;
19a V. Aliyev St., Grozny, Russia, 364051.
Tel. +79287812988
Email gairabekov_u@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6358-0477>

How to cite this article

Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh.,
Gagaeva Z.Sh. Seasonal states and carbon dynamics
in key areas of the carbon polygon in the Chechen
Republic, Russia. *South of Russia: ecology,
development*. 2024; 19(3):169-179. (In Russ.) DOI:
10.18470/1992-1098-2024-3-17

Received 12 March 2024

Revised 24 May 2024

Accepted 25 June 2024

Abstract

The aim of the work was to analyze the relationship between carbon dynamics and changes in the states of natural territorial complexes in two key areas of the carbon polygon in the Chechen Republic from the standpoint of landscape and landscape-geophysical approaches. The work was carried out at two sites of the carbon polygon in the Chechen Republic: in Chernorechye (the Chechen plain under water-protective broad-leaved forests, about 169 m above sea level) and Roshni-Chu (low-mountain broad-leaved forests, about 450 m above sea level).

Methods: landscape-geophysical description of geomasses, geohorizons and vertical structures in key areas, detailed microclimatic studies using installed loggers with temperature and humidity sensors, observations of the state of the vegetation cover, biomass dynamics, determination of mortmass fractions on the soil surface, as well as humus and basic nutrients.

The relationship between carbon dynamics and changes in seasonal states of natural-territorial complexes is expressed in changes in landscape-geophysical parameters: the ratio of geomasses, geohorizons and vertical structures. Seven seasonal states of natural-territorial complexes with different carbon dynamics have been identified. Two of them are key to understanding the long-term carbon balance. These states are determined by the dynamics of accumulation and decomposition of mortmass. The ways of changing the intensity of carbon deposition based on the creation of new phytocenoses, increasing soil fertility, including by optimising the carbon and nitrogen ratio have been identified. A more radical way – mortmass utilisation – requires detailed research and consideration of environmental consequences.

Key Words

State of natural-territorial complexes, vertical structure, carbon dynamics, geomass, geohorizon, phytomass, mortmass.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика углерода имеет континуально-дискретный характер, что связано как с изменениями природных компонентов и процессов, так и со сменой состояний природных систем в целом (экосистем, ландшафтов). Прерывистый характер изменений природных систем (природно-территориальных комплексов – ПТК) был убедительно продемонстрирован в трудах Н.Л. Беручашили [1]. Центральное понятие в подходах этого автора – состояние ПТК, понимаемое как соотношение структуры и функционирования в определенный промежуток времени, когда потоки вещества и энергии на входе трансформируются в определенные функции на выходе. В нашем контексте имеет смысл говорить о своеобразных карбоновых состояниях, под которыми следует понимать, прежде всего, такие соотношения структуры и функционирования конкретного ПТК, которые отражаются в балансе углерода: накоплении углерода, его эмиссия, либо сохранение относительно нейтрального баланса. В настоящее время вопросами динамики углерода занимаются ряд научных школ, использующих детальные наблюдения на стационарах и полигонах с помощью дорогостоящих приборов [2–5]. Особое значение имеют наблюдения в лесах [6]. При этом многие авторы обращают внимание на слабо изученную роль отдельных фракций лесной растительности, в частности, отпада или валежника в динамике углерода [7; 8].

Гораздо меньше исследований, которые ориентированы на качественную оценку динамики углерода, базирующуюся на выявленных закономерностях биофункционирования в рамках ландшафтной концепции [9–12]. Такого рода исследования имеют ряд положительных и отрицательных сторон. К отрицательным следует отнести преимущественно качественную оценку динамики углерода, без точных цифр, которые могли бы составить доказательную базу тех или иных утверждений. К положительным следует отнести применимость методики в полевых условиях, на маршрутах, а также в условиях резко пересеченной местности, например, в горах, где природное разнообразие затрудняет проведение стационарных исследований. В условиях большого ландшафтного разнообразия и сложности ландшафтной структуры распространение закономерностей, полученных на локальных участках по измерению динамики углерода (например, в лесах, [13–15]), требует особых алгоритмов, допущений, усреднений, которые в конечном счете снижают ценность точечных расчетов. Особое при этом занимают горные территории с их сложностью ландшафтной структуры и раздробленностью природных условий [16–19].

Цель работы – проанализировать связь динамики углерода и смены состояний ПТК двух ключевых участков карбонового полигона в Чеченской Республике с позиций ландшафтного и ландшафтно-геофизического подхода.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на двух участках карбонового полигона Чеченской Республики: в Черноречье (Чеченская равнина под водоохранными широколиственными лесами, 169 м над ур. м.) и Рошни-Чу (широколиственно-лесные низкогорья, около 450 м над ур. м.). Основными методами исследования стали:

ландшафтно-геофизическое описание геомасс, геогоризонтов и вертикальных структур на ключевых участках, детальные микроклиматические исследования с помощью установленных логгеров – датчиков температуры и влажности, наблюдения за состоянием растительного покрова, динамикой биомассы, определение фракций мортмассы на поверхности почвы, а также гумуса и основных питательных веществ. Наблюдения за состоянием растительного покрова осуществлялись по методике Н.Л. Беручашили [1].

Исследования проводились в течение вегетационного периода с апреля по октябрь 2023 г., отбирались пробы растительности, почв, которые затем в лабораторных условиях взвешивались в сыром и сухом виде. Для выделения состояний ПТК поэтапно анализировались: 1) ход метеоклиматических элементов – внутрисуточный ход температуры воздуха на высотах 0,5 и 2,0 м, осадков и влажности; 2) набор и сочетание основных геомасс и геогоризонтов, составляющих вертикальные структуры; 3) основные тенденции в изменениях вертикальной структуры, отражающие переходы из одних состояний в другие. В результате были получены графики метеоэлементов, сопряженные с динамикой основных состояний ключевых ПТК, а также данные по количеству фито- и мортмасс, химическому составу почв. На этой основе были проанализированы связи между динамикой запасов углерода в растительности, мортмассе и почвах и ходом метеоклиматических параметров по сезонам.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические сезоны года

Предварительный анализ графиков температуры и осадков за 2023 г. позволил выделить 7 подсезонных состояний за вегетационный период с апреля по октябрь (рис. 1). Они выделяются по преобладанию типичных суточных состояний с характерными сочетаниями тепла и влаги в воздухе и почве, различаются суточным ходом и внутрисуточной динамикой потоков энергии (табл. 1). Вегетация в приземных слоях начинается довольно рано, куртины черемши появляются уже в начале марта. Однако существенный прирост травянистой фитомассы начинает происходить, когда среднесуточные температуры начинают переходить отметку в 10° С, а почвы, закрытые слоем опада и валежника, прогреваются.

Сезонный ход метеоэлементов на двух участках карбонового полигона в Рошни-Чу и Черноречье показывает различные биоклиматические условия для динамики углерода. Весна рано начинается на участках; раньше в Черноречье и с некоторым запаздыванием в Рошни-Чу. Уже в апреле, когда среднесуточные температуры превышают 10–15° С, а ночные минимумы прекращаются, начинается интенсивное биофункционирование. В первую очередь, буйно начинает вегетировать травянистый покров. Деревья стоят без листьев, солнечные лучи проникают к почве, она нагревается, что приводит в полуденные часы к потоку тепла вверх. С середины мая среднесуточные температуры превышают 15–20° С. В это время начинается формирование микроклимата под пологом леса, поток тепла вверх отмечается только в ночное время. Наступление лета знаменуется переходом среднесуточных температур воздуха выше 20–25° С. В это время отмечается неустойчивый

характер погоды с частыми грозами. Влажность повышается до 70 %, наблюдается сглаженный суточный ход и стабилизация температурного режима с преимущественным поступлением энергии в почву (за исключением некоторых ночных часов). В это время не температура, а свет и вода играют важное значение в дифференциации растительного покрова.

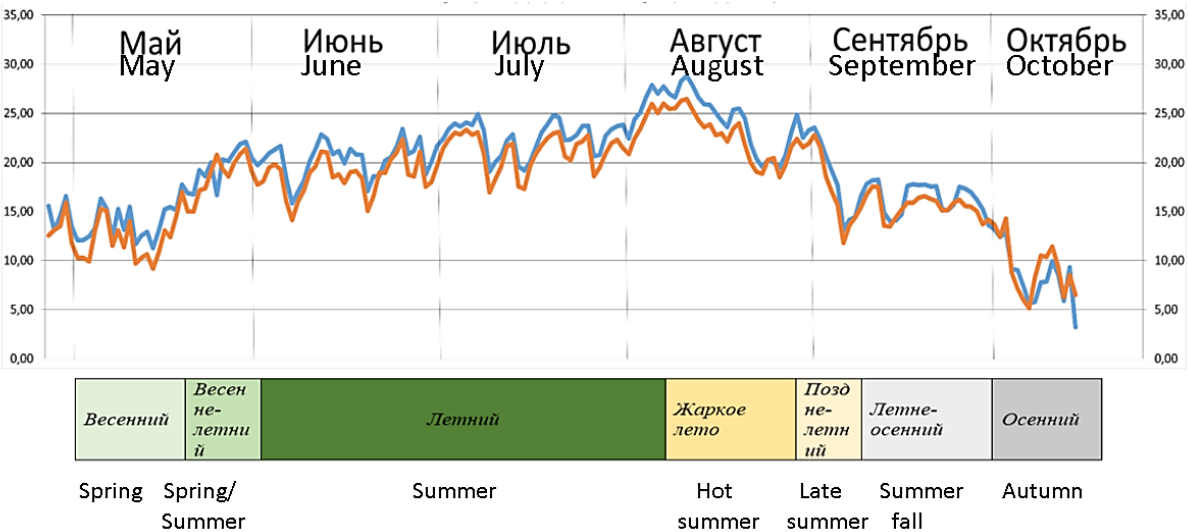


Рисунок 1. Сезонный ход среднесуточных температур воздуха на участках Черноречье (синяя линия) и Рошни-Чу (красная линия) и типы сезонных состояний

Figure 1. Seasonal variation of average daily air temperatures in the Chernorechye (blue line) and Roshni-Chu (red line) sections and types of seasonal conditions

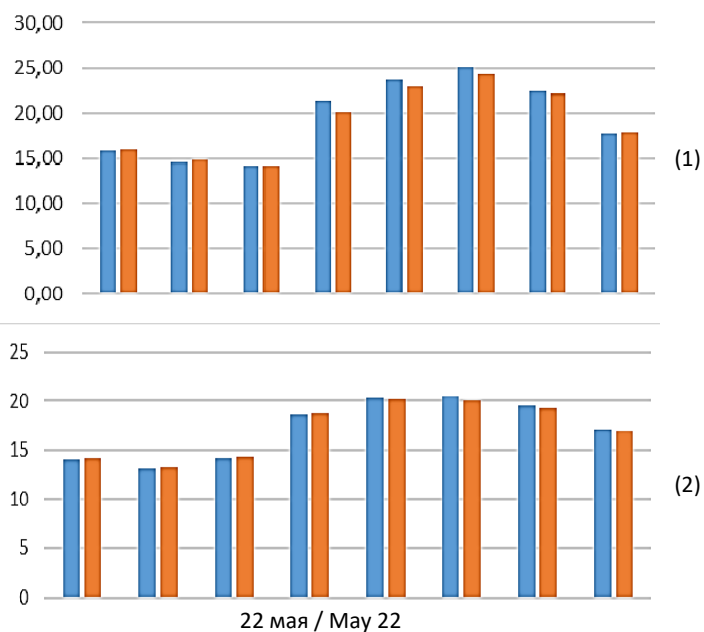
Таблица 1. Сезонные состояния и типичный суточный ход температуры воздуха на 0,5 и 2 м в Черноречье и Рошни-Чу

Table 1. Seasonal conditions and typical daily variation of air temperature at 0.5 and 2 m in Chernorechye and Roshni-Chu

Сезонное состояние Seasonal condition	Характеристика и типичные суточные состояния Characterization and typical diurnal states	Типичный суточный ход температуры воздуха на 0,5 и 2 м в Черноречье Typical daily air temperature variations at 0.5 and 2 m in Chernorechye (1)	Типичный суточный ход температуры воздуха на 0,5 и 2 м в Рошни-Чу Typical diurnal variation of air temperature at 0.5 and 2 m in Roshni Chu (2)
Весенний, с середины апреля по середину мая Spring, mid-April to mid-May	Среднесуточные температуры 10–15° С. Деревья стоят без листьев, солнечные лучи проникают к почве, она нагревается, поток тепла направляется вверх, идет активная вегетация травянистого покрова Average daily temperatures of 10–15° C. In tree stands without leaves, sun rays penetrate to the soil, heating it. Heat flow is directed upwards and there is active vegetation of herbaceous cover		

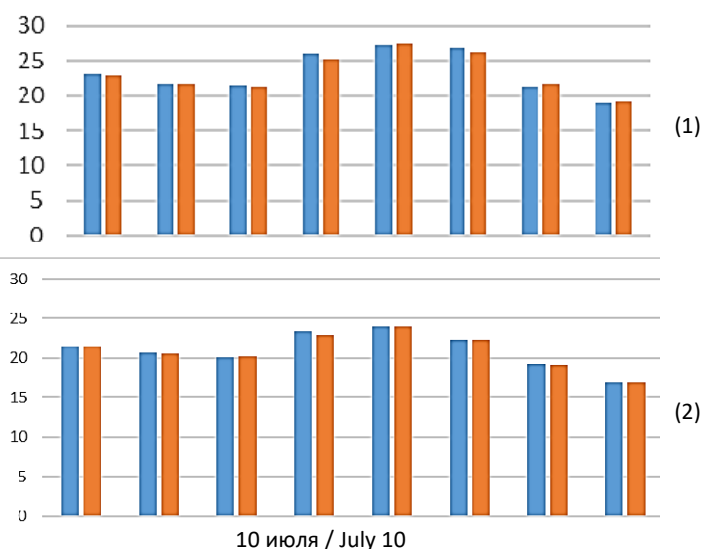
Весенне-
летний.
Середина
мая –
начало июня
Spring-
Summer.
Mid-May-
early June

Среднесуточные
температуры выше 15–20° С.
Формирование
микроклимата под пологом
леса, поток тепла вверх
только в ночное время
Average daily temperatures
are above 15–20° С.
Formation of microclimate
under the forest canopy, heat
flow upwards only at night



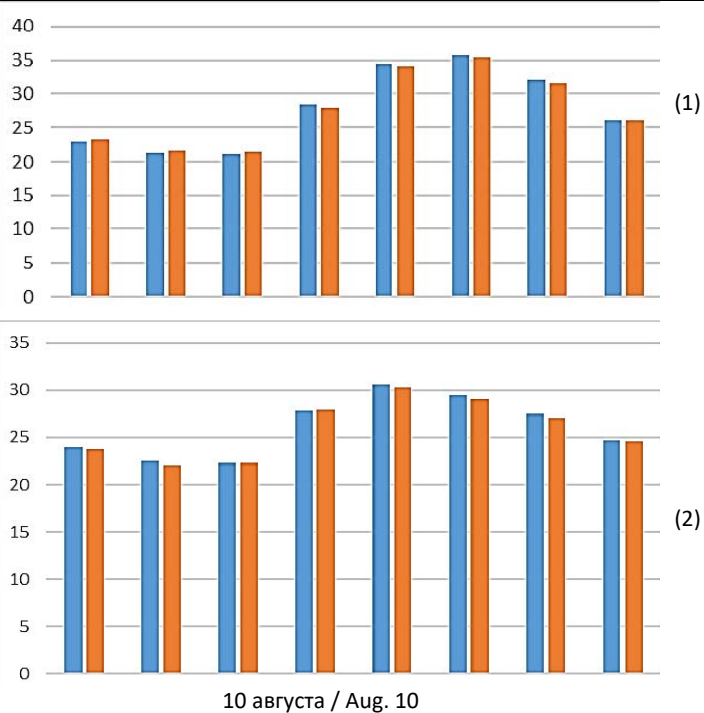
Летний:
июнь и июль
Summer:
June and July

Среднесуточные
температуры выше 20–25° С,
сглаженный суточный ход и
стабилизация
температурного режима с
преимущественным
поступлением энергии в
почву (за исключением
некоторых ночных часов)
Average daily temperatures
above 20–25° С, smoothed
diurnal variation and
stabilisation of the
temperature regime with
predominant energy input to
the soil (except for some night
hours)



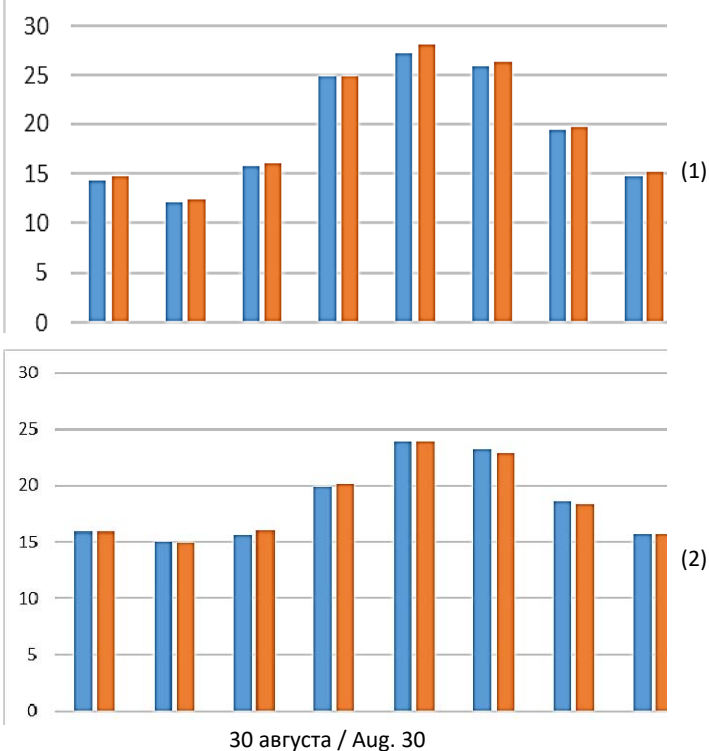
Жаркое
лето, три
первые
декады
августа
Hot summer,
the first
three
decades of
August

Среднесуточные
температуры превышают
25° С, наблюдается
недостаток влаги в почвах,
суточный ход снова имеет
пики в дневное время
Average daily temperatures
exceed 25° С, there is a lack of
moisture in soils, the diurnal
course again has peaks in the
daytime



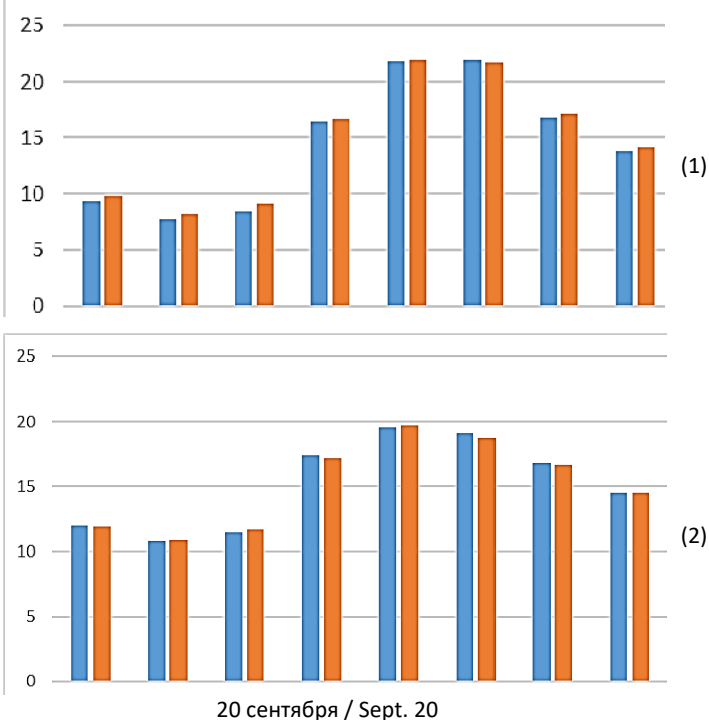
Позднее
лето,
последняя
декада
августа,
первая
декада
сентября
Late
summer: last
decade of
August, first
decade of
September.

Среднесуточные
температуры падают,
возрастают пики, понижение
– в ночное время, почва
продолжает испытывать
дефицит влаги
Average daily temperatures
are falling, peaks are
increasing, decreases are at
night and the soil continues to
experience moisture deficits.



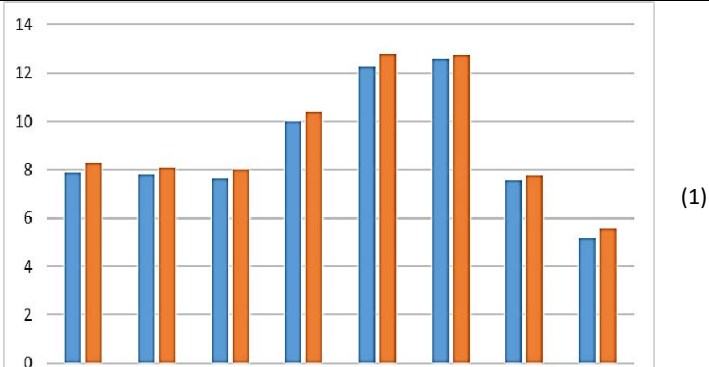
Летне-
осенний
период:
первая
декада
сентября –
конец
сентября
Summer-
autumn: first
decade of
September -
end of
September

Среднесуточные
температуры около 15° C,
понижение потоков тепла в
Рошни-Чу быстрее
вследствие затенения
горными хребтами (ранний
закат)
Average daily temperatures
around 15° C, heat fluxes
decrease faster in Roshni-Chu
due to shading by mountain
ranges (early sunset)

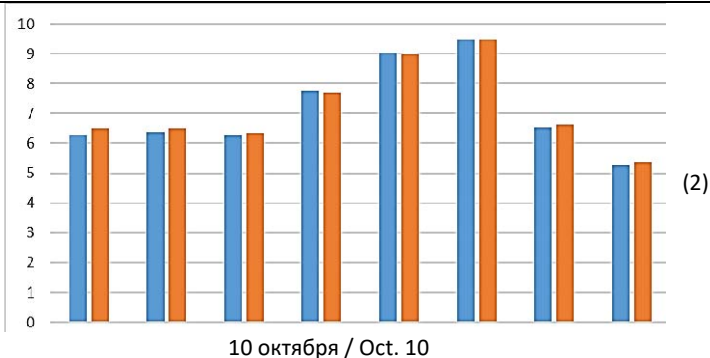


Осенний.
Конец
сентября –
середина
октября
Autumn:
Late
September
through mid-
October

Среднесуточная
температура колеблется
в промежутке 5–15° C.
В Чернолесье максимум
достигается раньше,
в Рошни-Чу теплый воздух
держится за счет
мезорельефа дольше
Average daily temperature
varies between 5–15° C.
The maximum is reached
earlier in Chernolesie,
in Rošni-Chu warm air



stays longer due to the mesorelief



Особым периодом является август, когда выделяются жаркие сухие состояния. Среднесуточные температуры превышают 25° С, наблюдается недостаток влаги в почвах, суточный ход снова имеет пики в дневное время. Уже ближе к осени среднесуточные температуры воздуха постепенно понижаются, возрастают пики, с понижением в ночное время, почва продолжает испытывать дефицит влаги. В переходные от лета к осени состояния среднесуточные температуры понижаются до 15° С. При этом понижение потоков тепла в Рошни-Чу идет быстрее вследствие затенения горными хребтами (ранний закат). В типично осенние состояния конца сентября и октября среднесуточная температура колеблется в промежутке 5–15° С. В Черноречье максимум достигается раньше, в Рошни-Чу теплый воздух может держаться за счет мезорельефа дольше. Каждое из состояний играет свою роль в жизни природных комплексов. Обращает внимание растянутасть и относительная однородность летнего сезона (июнь и июль), что достигается за счет обилия тепла и влаги, их относительно равномерного прихода. В конце лета и осенью наблюдается недостаток влаги в почве, что приводит к замедлению биофункционирования.

Вертикальная структура и ее динамика

Изменение биоклиматических условий выражается в динамике вертикальной структуре, которую можно представить в виде сочетания геомасс и геогоризонтов (рис. 2, 3). ПТК в Черноречье представлен широколиственно-лесными ландшафтами. Их подробное описание дано в предыдущей работе авторов [20]. Лесные фитоценозы находятся в климаксовом состоянии, доминантами являются буково-грабовые леса с участием клена, дуба, ясеня (первый ярус), лещина, боярышник (2 ярус). В травянистом покрове преобладает овсяница, разнотравье, а также куртины черемши.

Сезонные состояния выражены в типах вертикальных структур, отражающих функционирование ПТК. Геогоризонты сложены геомассами, которые разделяются на активные и относительно пассивные. К активным геомассам, которые выступают в качестве «кирпичиков» отдельных состояний, относятся: фитомассы мезофильных листьев, а также травянистых растений, мортмассы ветоши и подстилки. Относительно пассивными геомассами являются педомассы (легкий и средний суглинок), литомассы (в почвенном профиле они представлены небольшими известковистыми образованиями в нижнем горизонте почв), фитомассы стволов и веток, а также мортмассы валежника.

Вертикальные структуры состоят из надземных и подземных геогоризонтов. К надземным относятся: геогоризонты веток, стволов и листьев, которые

аккумулируют и транспортируют углерод. Их проективное покрытие от 5 до 30 %, нижние ярусы (кустарники и подрост) достигают 50 %. Общая сухая фитомасса достигает 160 т/га. Аккумулятивную функцию выполняет геогоризонт травянистой растительности, который сочетается с мортмассами в виде валежника и ветоши. Общее проективное покрытие достигает 60–65 %. Значительную массу занимает валежник (до 10 т/га), а зеленая фитомасса занимает лишь 0,1 т/га. Приземные геогоризонты состоят в основном из мортмассы – подстилки, опада и валежника, реже, ветоши. Их общая мортмасса занимает около 10 т/га. Они постепенно переходят в подземные геогоризонты из полуразложившейся подстилки, смешанной с суглинистыми фракциями почв, а также корнями растений. Ниже их идут почвенные геогоризонты с суглинком, корнями, а также почвенной влагой. Общая масса корней около 40 т/га.

Динамика фитомассы травянистой растительности и мортмассы отражена на рисунке 4. Наземная мортмасса имеет максимум в весеннее время. Приход тепла приводит к биогенной деструкции валежника, а также подстилки и ветоши, которая замедляется в летнее время. Зеленая фитомасса травянистой растительности характеризуется резким ростом, начиная с летнего состояния. Тем не менее максимум зеленой фитомассы в два раза меньше мортмассы – потенциального источника для накопления углерода.

Судя по результатам почвенных анализов (табл. 2), почвы характеризуются относительно низкой активностью, содержание гумуса относительно небольшое, а по показателям углерода и азота, активность почвенных процессов замедленная. Дефицит азота приводит к замедлению роста деревьев [20].

Преимущественно за аккумуляцию углерода отвечают геогоризонты веток и листьев, а также геогоризонт с травянистой растительностью. Их фитомасса относительно мала (около 1,5–2 % от общей фитомассы). В остальных геогоризонтах углерод теряется за счет биогенной деструкции. Это в основном геогоризонты, состоящие преимущественно из мортмасс. В вегетационном цикле можно выделить три типа состояний ПТК: 1) баланс аккумуляции и выброса углерода (весеннее и весенне-летнее состояния); 2) преобладание выброса углерода над его аккумуляцией за счет активного разложения мортмасс (летнее состояние и состояние жаркого лета); 3) преобладание аккумуляции за счет отложения углерода в мортмассах, а также частичного перехода в почвы (поздне-летнее, летне-осеннее и осеннее состояния).



Рисунок 2. Описание почвенного профиля и отбор проб в ПТК широколиственного разновозрастного леса на участке Черноречья

Figure 2. Description of the soil profile and sampling in the PTC of a broad-leaved forest of different ages in the Chernorechye area

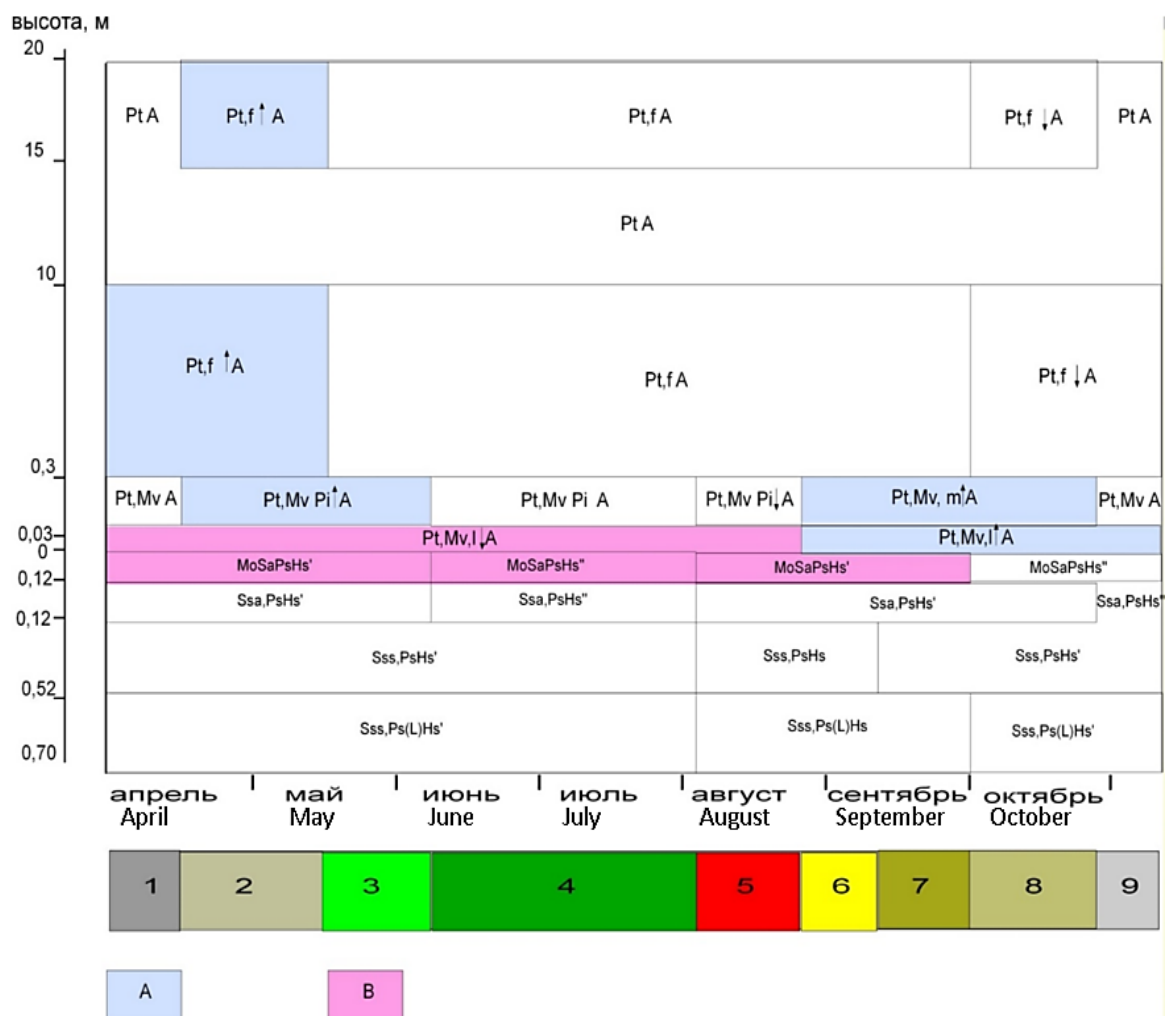


Рисунок 3. Динамика состояний и ее связь с вертикальной структурой ПТК участка Черноречье (широколиственный лес в водоохранной зоне г. Грозный)

Figure 3. Dynamics of states and its connection with the vertical structure of the natural territorial complex of the Chernorechye site (broad-leaved forest in the water protection zone of the city of Grozny)

Примечание: Цифрами на рисунке показаны сезоны: ранне-весенний (1), весенний (2), весенне-летний (3), летний (4), жаркое лето (5), поздне-летний (6), летне-осенний (7), осенний (8), поздне-осенний (9).
А – геогоризонты с преимущественной аккумуляцией углерода, В – геогоризонты с преимущественной потерей углерода (за счет биогенной деструкции). Знаками показаны геомассы: А – аэромассы, Р – фитомассы, Рt – стволы и ветки деревьев и кустарников, Рf – мезофильные листья, Рi – травянистая фитомасса, М – мортмассы, Мv – отпад, валежник, Мm – ветошь, Мl – подстилка, Мо – мор, полуразложившаяся подстилка, S – пedomассы, Ssa – легкий суглинок, Sss – средний суглинок, L – литомассы, Н – гидромассы. Гидромассы в почвах Н'' – влажность более 50%, Н' – 30–50 %, Н – менее 30 %. Динамика геомасс: ↑ – увеличение, ↓ – уменьшение
Note: The numbers in the figure indicate the seasons: early spring (1), spring (2), spring-summer (3), summer (4), hot summer (5), late summer (6), summer-autumn (7), autumn (8), late autumn (9). A – geohorizons with predominant accumulation of carbon, B – geohorizons with predominant loss of carbon (due to biogenic destruction).
The signs indicate geomasses: A – aeromasses, P – phytomass, Pt – trunks and branches of trees and shrubs, Pf – mesophilic leaves, Pi – herbaceous phytomass, M – mortmass, Mv – waste, deadwood, Mm – rags, Ml – litter, Mo – mor, semi-decomposed litter, S – pedomass, Ssa – light loam, Sss – medium loam, L – lithomass, H – hydromass. Hydromass in soils H'' – humidity more than 50%, H' – 30–50 %, H – less than 30 %.
Geomass dynamics: ↑ – increase, ↓ – decrease

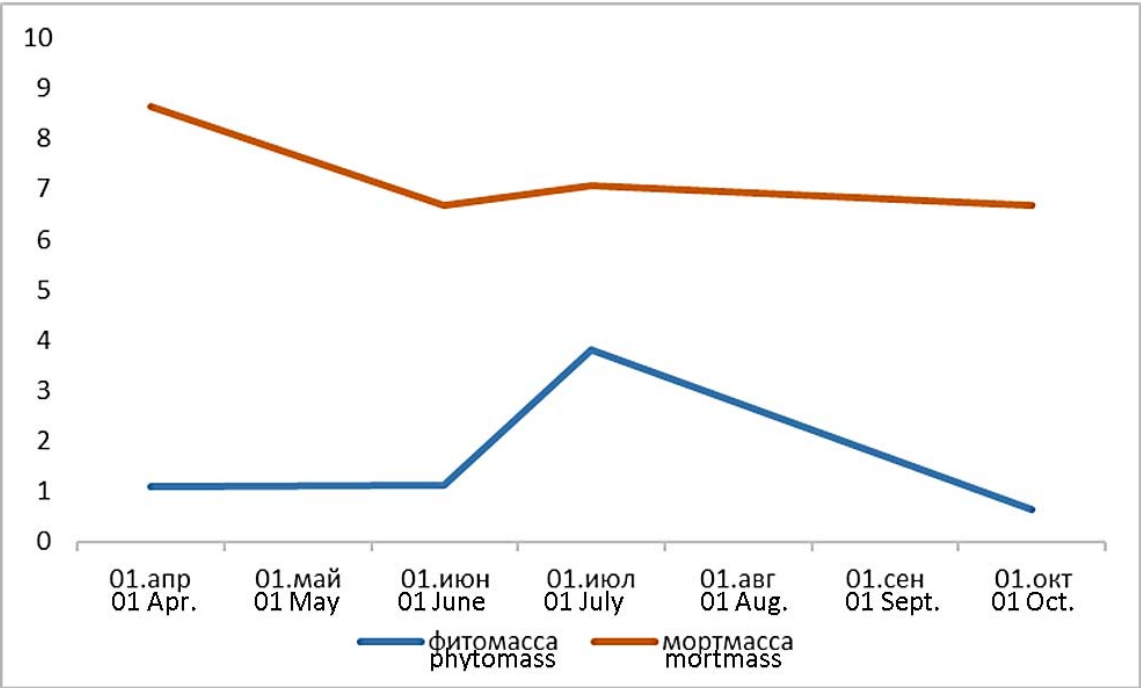


Рисунок 4. Динамика фитомассы и мортмассы (т/га, в перерасчете на сухой вес) на участке Черноречья
Figure 4. Dynamics of phytomass and mortmass (t/ha, in terms of dry weight) in the Chernorechye area

Таблица 2. Показатели плодородия почв на ключевых участках
Table 2. Soil fertility indicators in key areas

Почвенные горизонты Soil horizons	Глубина (усредненная, см) Depth (average, cm)	Черноречье / Chernorechye		Рошни-Чу / Roshni-Chu	
		Гумус (%) Humus (%)	Соотношение гумуса и азота (C/N) Humus to nitrogen ratio (C/N)	Гумус (%) Humus (%)	Соотношение гумуса и азота (C/N) Humus to nitrogen ratio (C/N)
Ао-А1	0–12	6,9	2,8	4,3	1,075
АВ	12–30	5,6	2	2,2	1,1
В	30–52	2,9	1	1,5	0,75
В-ВС	52–75	1,8	0,5	0,9	0,45

Выводы
Связь динамики углерода и смены состояний ПТК двух ключевых участков карбонового полигона в Чеченской Республике отражается по изменению ландшафтно-геофизических параметров: соотношения геомасс, геогоризонтов и вертикальных структур. На основе выделения и измерения этих параметров определены набор и смена основных состояний природных

комплексов участков карбонового полигона в вегетационный период. Центральное место занимает связанная с ходом метеозлементов динамика перехода зеленой фитомассы в мортмассу, разложение мортмассы с переходом в летучие газы и, в меньшей степени, – депонирование углерода в почву. Наблюдения показывают, что критически важным для

понимания динамики углерода являются приземные слои мортмассы, переходящие в верхние слои почв.

На наблюдаемых участках баланс углерода почти не зависит от состава растительности, которая находится в климатическом состоянии, депонирование углерода возможно только в его аккумуляции в почвах, что происходит достаточно медленно. Способствовать депонированию углерода можно на основе конструирования новых фитоценозов (что вряд ли реализуемо, учитывая природоохранный режим участков полигона), либо путем воздействия на процессы почвообразования, улучшения их плодородия, в частности, повышения соотношения углерода и азота. Другим, более радикальным, путем можно считать специальную утилизацию мортмассы. Однако в данном случае надо просчитать экологические последствия утилизации, которая содержит микрофлору и выполняет важные экологические функции природных комплексов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0004 «Комплексное изучение потоков парниковых газов на природных и антропогенно-нарушенных ландшафтах Чеченской Республики и разработка научно-обоснованных рекомендаций по восстановлению биоресурсного потенциала нарушенных земель».

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out within the framework of the Millionshchikov GSTOU FZNU-2024-0004 "Complex study of greenhouse gas fluxes in natural and anthropogenically disturbed landscapes of the Chechen Republic and development of scientifically based recommendations on greenhouse gas fluxes in natural and anthropogenically disturbed landscapes: Science-based recommendations on restoration of bio-resource potential of disturbed lands.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. Москва: Мысль, 1986. 182 с.
2. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / Под ред. Замолотчикова Д.Г. и др. Саратов: Амрит, 2017. 279 с.
3. Суховеева О.Э., Карелин Д.В., Золотухин А.Н., Почикалов А.В. Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России // *Почвоведение*. 2023. N 9. С. 1077–1088.
4. Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Глаголев М.В., Добрянский А.С., Сабреков А.Ф., Замотаев И.В. Годовой бюджет углеродсодержащих биогенных парниковых газов при смешанном землепользовании: Львовский район как модельный объект центрального Черноземья // *Почвоведение*. 2023. N 8. С. 911–924.
5. Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Эльжаев А.С., Мамадиев Н.А. Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный) // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(4). С. 153–168.
6. Ni Y., Eskeland G.S., Giske J., Hansen J.-P. The global potential for carbon capture and storage from forestry // *Carbon Balance and Management*. 2016. V. 11(3). P. 1–8.
7. Иванов А.В., Браун М., Замолотчиков Д.Г., Лошаков С.Ю., Потоцкий О.В. Эмиссия углерода в поверхности

валежа в кедровых лесах Южного Приморья. *Экология*.

2018. N 4. С. 275–281.

8. Sun X.Y., Wang C.K. Carbon dioxide fluxes from downed log decomposition of major tree species in northeastern China // *Acta Ecologica Sinica*. 2007. V. 27(12). P. 5130–5137.

9. Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.

10. Гайрабеков У.Т., Гуня А.Н., Керимов И.А. К вопросу об изучении динамики углерода в горных ландшафтах Чеченской Республики на основе ландшафтно-геофизического подхода Н.Л. Беручашвили // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2021. Т. 15. N 4. С. 27–38. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-27-38

11. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Гагаева З.Ш. Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике // *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4) С. 135–148.

12. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. Т. 12(3). С. 170–181.

13. Kurz W.A., Apps M.J., Banfield G.E., Stinson G. Forest carbon accounting at the operation scale // *The For. Chron.* 2002. V. 78. N 5. P. 672–679.

14. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Верховец С.В., Рубцов А.В. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2016. Т. 9. N 3. С. 338–357.

15. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue // *InterCarto. InterGIS*. 2017. V. 23. P. 373–382. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382>

16. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China // *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. V. 82(1). P. 52–

64. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100052>

17. Amanuel W., Yimer F., Karlton E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia // *Journal of Ecology and Environment*. 2018. V. 42(1). P. 1–11.

18. Hilton R.G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle // *Nature Reviews Earth and Environment* 2020. V. 1. P. 284–299. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>

19. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia // *Sustainability*. 2021. V. 13(15). Article ID: 8332. <https://doi.org/10.3390/su13158332>

20. Marshall L.A., Falk Donald A., McDowell Nate G. Nitrogen can limit overstory tree growth following extreme stand density increase in a Ponderosa pine forest // *Tree-Ring Research*. 2019. V. 75. Iss. 1. P. 49–60.

REFERENCES

1. Beruchashvili N.L. *Chetyre izmereniya landshafta* [Four Dimensions of Landscape]. Moscow, Mysl Publ., 1986, 182 p. (In Russian)
2. *Monitoring potokov parnikovoykh gazov v prirodnykh ekosistemakh* [Monitoring of greenhouse gas fluxes in natural ecosystems]. Saratov, Amirit Publ., 2017, 279 p. (In Russian)
3. Sukhoveeva O.E., Karelin D.V., Zolotukhin A.N., Pochikalov A.V. Soil respiration in agrarian and natural ecosystems of the

- European territory of Russia. *Pochvovedeniye* [Soil Science]. 2023, no. 9, pp. 1077–1088. (In Russian)
4. Karelin D.V., Sukhoveeva O.E., Glagolev M.V., Dobryanskiy A.S., Sabrekov A.F., Zamotaev I.V. Annual budget of carbon-containing biogenic greenhouse gases under mixed land use: Lgovsky district as a model object of the central Chernozem. *Pochvovedeniye* [Soil Science]. 2023, no. 8, pp. 911–924. (In Russian)
 5. Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Mamadiev N.A. Analysis of greenhouse gases in oil-contaminated areas and the development of methods for their bioremediation (on the example of Grozny). *Geology and Geophysics of Southern Russia*, 2022, no. 9, vol. 12(4), pp. 153–168. (In Russian)
 6. Ni Y., Eskeland G.S., Giske J., Hansen J.-P. The global potential for carbon capture and storage from forestry. *Carbon Balance and Management*. 2016, vol. 11(3), pp. 1–8.
 7. Ivanov A.V., Brown M., Zanolodchikov D.G., Loshakov S.Y., Pototsky O.V. Carbon emission in the deadwood surface in cedar forests of Southern Primorye. *Ekologiya* [Ecology]. 2018, no. 4, pp. 275–281. (In Russian)
 8. Sun X.Y., Wang C.K. Carbon dioxide fluxes from downed log decomposition of major tree species in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*. 2007, vol. 27(12), pp. 5130–5137.
 9. Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of complex physiographic studies]. Moscow, MSU Publ., 1997, 320 p. (In Russian)
 10. Gayrabekov U.T., Gunya A.N., Kerimov I.A. On the study of carbon dynamics in mountain landscapes of the Chechen Republic on the basis of landscape-geophysical approach N.L. Beruchashvili. *Izvestia Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 27–38. (In Russian) DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-27-38
 11. Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass fractions at the key areas of the Carboniferous polygon in the Chechen Republic. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* [Geology and Geophysics of the South of Russia]. 2023, vol. 13(4), pp. 135–148. (In Russian)
 12. Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Gagaeva Z.Sh. Study of landscape structure for estimation of carbon balance of mountain ecosystems. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* [Geology and Geophysics of the South of Russia]. 2022, vol. 12(3), pp. 170–181.
 13. Kurz W.A., Apps M.J., Banfield G.E., Stinson G. Forest carbon accounting at the operation scale. *The For. Chron.* 2002, vol. 78, no. 5, pp. 672–679.
 14. Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Vaganov E.A., Verkhovets S.V., Rubtsov A.V. Dynamics of CO₂ fluxes from the soil surface in pine stands in Central Siberia. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* [Journal of Siberian Federal University. Series: Biology]. 2016, vol. 9, no. 3, pp. 338–357. (In Russian)
 15. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*, 2017, vol. 23, pp. 373–382. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382>
 16. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F. E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2022, vol. 82(1), pp. 52–64. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100052>
 17. Amanuel W., Yimer F. and Karlton E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*, 2018, vol. 42(1), pp. 1–11.
 18. Hilton R.G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, vol. 1, pp. 284–299. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>
 19. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 2021, vol. 13(15), article id: 8332. <https://doi.org/10.3390/su13158332>
 20. Marshall L.A., Falk Donald A., McDowell Nate G. Nitrogen can limit overstory tree growth following extreme stand density increase in a Ponderosa pine forest. *Tree-Ring Research*, 2019, vol. 75, no. 1, pp. 49–60.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Алексей Н. Гуня, Умар Т. Гайрабеков, Любовь Ш. Махмудова и Зулфира Ш. Гагаева собрали и обработали материалы, описали результаты. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexey N. Gunya, Umar T. Gayrabekov, Lyubov Sh. Makhmudova and Zulfira Sh. Gagaeva collected and processed the materials and described the results. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Алексей Н. Гуня / Alexey N. Gunya <https://orcid.org/0000-0002-9255-1592>
 Умар Т. Гайрабеков / Umar T. Gayrabekov <https://orcid.org/0000-0001-6358-0477>
 Любовь Ш. Махмудова / Lyubov Sh. Makhmudova <https://orcid.org/0000-0002-3104-9275>
 Зулфира Ш. Гагаева / Zulfira Sh. Gagaeva <https://orcid.org/0000-0001-8216-2449>