



Особенности биогеоцикла и динамики углерода в ландшафтном экотоне «горы – равнины» (на примере Карбонового полигона Чеченской Республики)

Алексей Н. Гуня^{1,3}, Умар Т. Гайрабеков^{2,3}, Любовь Ш. Махмудова³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия

³Грозненский 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.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6358-0477>

Формат цитирования

Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Особенности биогеоцикла и динамики углерода в ландшафтном экотоне «горы – равнины» (на примере Карбонового полигона Чеченской Республики) // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 2. С. 153-164. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-12

Получена 17 февраля 2025 г.

Прошла рецензирование 25 марта 2025 г.

Принята 28 апреля 2025 г.

Резюме

Цель – разработать схему биогеоцикла на основе изучения сезонной динамики горно-лесных экосистем в ландшафтном экотоне «горы – равнины».

В основу работы положены полустационарные наблюдения на трех участках Карбонового полигона Чеченской Республики. В различные сезоны года фиксировался ход температуры, влажности и осадков, проводились ландшафтно-фенологические и ландшафтно-геофизические обследования, включающие описание и измерения набора и сочетания основных геомасс и геогоризонтов, составляющих вертикальные структуры, отбор проб для определения фито и мортмасс.

Выделены 8 типов суточных гидротермических состояний природных комплексов, которые в сочетании с тенденциями в биогеоцикле создают 15 ландшафтно-экологических состояний, характеризующихся различными условиями биогеоцикла и динамики углерода. В низкогорье наблюдается относительно простой биогеоцикл, определенная часть фитомассы депонируется в стволах, ветках и корнях деревьев. В предгорье в биогеоцикле наблюдаются разнонаправленные тренды в динамике углерода. Преимущественная потеря углерода за счет быстрой минерализации мортмасс с частичным накоплением углерода в почве наблюдается в широколиственных предгорно-равнинных лесах.

Сезонная динамика фито- и мортмассы на ключевых участках различается. Обоснованы три возможных пути влияния на биогеоцикл с целью повышения положительного баланса углерода.

Ключевые слова

Вертикальная структура, динамика углерода, геомасса, геогоризонт, фитомасса, мортмасса, биогеоцикл.

Features of the biogeocycle and carbon dynamics in the landscape ecotone "mountains – plains" (using the example of the carbon polygon of the Chechen Republic, Russia)

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

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

²Academy of Sciences, Chechen Republic, Grozny, Russia

³M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technological University, Grozny, Chechen Republic Russia

Principal contact

Umar T. Gairabekov, Doctor of Geographic Sciences, Associate Professor, Institute of Natural Resources, Academy of Sciences, 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., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Features of the biogeocycle and carbon dynamics in the landscape ecotone "mountains – plains" (using the example of the carbon polygon of the Chechen Republic, Russia). *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(2):153–164. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-12

Received 17 February 2025

Revised 25 March 2025

Accepted 28 April 2025

Abstract

The objective was to develop a biogeocycle scheme based on the study of the seasonal dynamics of mountain-forest ecosystems in the "mountains – plains" landscape ecotone.

The work is based on semi-stationary observations at three sites of the Carbon Polygon of the Chechen Republic. In different seasons of the year the course of temperature, humidity and precipitation was recorded and landscape-phenological and landscape-geophysical surveys were carried out, including the description and measurements of the set and combination of the main geomasses and geohorizons that make up vertical structures and sampling to determine phyto- and mortmasses.

Eight types of daily hydrothermal states of natural complexes are identified, which, in combination with trends in the biogeocycle, create 15 landscape-ecological states characterised by different conditions of the biogeocycle and carbon dynamics. In the lowlands, a relatively simple biogeocycle is observed; a certain part of the phytomass is deposited in the trunks, branches and roots of trees. In the foothills, the biogeocycle shows multidirectional trends in carbon dynamics. Preferential loss of carbon due to rapid mineralisation of mortmass with partial accumulation of carbon in the soil is observed in broad-leaved foothill-plain forests.

Seasonal dynamics of phyto- and mortmass in key areas differ. Three possible ways of influencing the biogeocycle in order to increase the positive carbon balance are substantiated.

Key Words

Vertical structure, carbon dynamics, geomass, geohorizon, phytomass, mortmass, biogeocycle.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики углерода находится в центре внимания ученых и экспертов в связи с изменением климата и возможным влиянием на содержание углерода в атмосфере за счет регулируемой трансформации наземных экосистем [1; 2]. В центре находятся исследования на созданных карбоновых полигонах, имеющих унифицированные программы наблюдений за динамикой углерода [3]. В ареалах с сильно фрагментированным и контрастным экосистемным покровом и сложной ландшафтной структурой точечные наблюдения нуждаются в дополнительном методологическом сопровождении для обеспечения репрезентативности получаемых данных на стационарах [4]. Слабо исследованы пространственные вариации в динамике углерода на ландшафтных экотонах, представляющих резкие контрасты между горными слабо нарушенными и сильно нарушенными и трансформированными предгорно-равнинными экосистемами. Для оценки динамики углерода в таких ландшафтных экотонах требуется детальное исследование природных циклов, в первую очередь, энергообмена, влагооборота и биогеоцикла. Изучение природных циклов неотрывно от исследования закономерностей циклической и направленной динамики во вмещающих экосистемах, исследования упорядоченности во времени состояний этих экосистем, их длительности и последовательного хода (их хроноструктуры). Континуально-дискретный характер изменений экосистем был убедительно продемонстрирован в трудах биогеоценологов и ландшафтоведов (например, [5] и др.).

Первостепенное значение для оценки баланса и динамики углерода в ландшафтах умеренного пояса имеет сезонная динамика экосистем и их компонентов. Изучение сезонной динамики растительности и ландшафтов имеет глубокие корни в фенологии. Исаченко А.Г. [6] считает сезонную динамику ландшафта составной частью ландшафтной структуры. Хроноструктура ландшафта на уровне внутрисезонных состояний – повторяющийся набор сезонных состояний, который отражает некую «память» ландшафтов и формирует реакцию на межгодовые изменения. Анализ этой «памяти» ландшафта был осуществлен на основе типизации структуры года с учетом формирования термических полей в конкретных ландшафтах.

В данной работе будет подробно рассмотрен только один из трех основных названных природных циклов – биогеоцикл с тем, чтобы определить основные характеристики баланса углерода, обозначить неувязки, вызванные дыханием почвы и динамикой активных газов. Для объяснения связей между звеньями биогеоцикла требуются, как правило, трудоемкие детальное исследования. Более простая методика изучения биогеоцикла, которая апробирована в полевых условиях, опирается на выделение дискретных временных отрезков – состояний, характеризующихся конкретными данными на входе и выходе [5]. Состояние природного комплекса является центральным понятием, которое стоит в основе моделирования природных циклов в рамках ландшафтно-геофизического подхода. Оно характеризуется таким соотношением параметров структуры и функционирования в определенный промежуток времени, в течение которого вход энергии, влаги и

других потоков трансформируется в определенные измеряемые функции на выходе – прирост фитомассы, сток, затраты на дыхание и др. Важность изучения закономерностей распределения и динамики состояний ландшафтов, раскрывающих структурированность природных процессов во времени, общепризнана. Сезонная динамика углерода раскрывает также зональные особенности биогеоцикла [7].

Более ранние наблюдения на ключевых участках показали, что в самой вертикальной структуре индикаторами смен состояний являются появление или выпадение отдельных геогоризонтов, играющих важную роль в динамике углерода [8]. Полученные ранее результаты по исследованию сезонной структуры подчеркнули важную роль сезонов, которые характеризуются переходом зеленой фитомассы в мортмассу с последующим разложением мортмассы. Опираясь на полученные в предыдущие годы результаты, в данной работе была поставлена цель – разработать схему биогеоцикла на основе изучения сезонной динамики горно-лесных экосистем в ландшафтном экотоне «горы – равнины». Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- изучить сезонную динамику ненарушенного лесного участка и лесного с умеренным антропогенным воздействием;
- разработать схему биогеоцикла с различными сценариями утилизации отдельных фракций мортмассы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы положен ландшафтно-геофизический подход, который хорошо зарекомендовал себя при оценке динамики углерода в горных ландшафтах со сложной морфологической структурой. Этот подход предполагает структурно-функциональный анализ и синтез природных комплексов: выделение элементарных составляющих функционирования – геомасс с последующим их синтезом в геогоризонты. Набор геомасс и геогоризонтов индицирует конкретное состояние структуры и функционирования, отражая связь в цепочке «структура-процесс». Конкретное соотношение геомасс и геогоризонтов, стратифицированных по отношению к основным потокам вещества и энергии, выражается в вертикальной структуре природных комплексов. Именно тип вертикальной структуры конкретного природного комплекса указывает на характер и интенсивность трех основных циклов – энергообмена, влагооборота и биогеоцикла. Многочисленные исследования показали, что изучение геомасс, геогоризонтов и вертикальной структуры способствует определению основных параметров природных циклов и указывает на направление природной динамики [9].

Были проведены полустационарные наблюдения на трех участках карбонового полигона Чеченской Республики (рис. 1):

- 1) окультуренный участок сухостепных ландшафтов с относительно выровненным рельефом и небольшим перепадом высот (104–114 м) («карбоновая ферма») в Алханчурской долине на междуречье р. Сунжи и ее притока р. Нефтянки на северо-восточной окраине г. Грозного;

2) участок в Черноречье (Чеченская равнина под водоохранными широколиственными лесами, 169 м н. у. м.);

3) участок Рошни-Чу (широколиственно-лесные низкогогорья, около 450 м н. у. м.).

На участках были спланированы и реализованы наблюдения и измерения сезонных изменений в

биогеоциклах. Ключевые участки различаются по условиям миграции химических элементов. Как видно из рисунка 1, ключевой участок Рошни-Чу расположен в элювиально-аккумулятивных условиях, уровень грунтовых вод не влияет на биогеоцикл. Увлажнение осуществляется за счет атмосферных осадков и частично – за счет делювиального смыва.

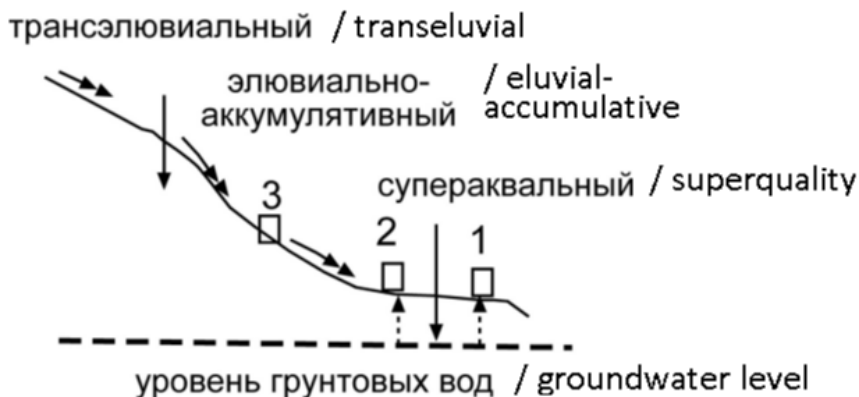


Рисунок 1. Расположение ключевых участков по условиям миграции химических элементов:

1 – «Карбоновая ферма», 2 – Черноречье, 3 – Рошни-Чу

Figure 1. Location of key areas according to the conditions of migration of chemical elements:

1 – “Carbon farm”, 2 – Chernorechye, 3 – Roshni-Chu

Участки «карбоновая ферма» и Черноречье расположены в супераккумулятивных условиях, при которых важную роль играет уровень грунтовых вод. Следует отметить, что на Чеченской равнине уровень грунтовых вод сильно зависит от сезона года. При этом значительную часть года природный комплекс находится в условиях недостаточного атмосферного и грунтового увлажнения. В этом случае тип миграции химических элементов приближается к аккумулятивно-элювиальным условиям.

На участках фиксировались микроклиматические параметры на основе данных логгеров – датчиков температуры и влажности. Был получен ход метеоклиматических элементов – внутрисуточный ход температуры воздуха на высотах 0,5 и 2,0 м. Выделение состояний проводилось по разработанной Н.Л. Берущавили методике [5], предполагающей ландшафтно-геофизическое описание геомасс, геогоризонтов и вертикальных структур на ключевых участках, наблюдения за состоянием растительного покрова, динамикой биомассы, определение фракций мортмассы на поверхности почвы, а также гумуса и основных питательных веществ. Для построения моделей биогеоциклов использовались расчеты по запасам надземной и подземной массы на единицу площади ($г/м^2$, $т/га$). Определение фитомассы древостоя проводилось по методике, используемой при экспедиционных исследованиях [10]. Регулярные наблюдения на участках заложили основу к выделению влажностно-термических состояний, которые соответствуют различным фенофазам растений, интенсивности разложения подстилки и опада, интенсивности и характеру других биогенных и абиогенных процессов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная структура ключевых участков

Анализ хода температуры, влажности и осадков за 2022–2024 гг., ландшафтно-фенологические и

ландшафтно-геофизические обследования ключевых участков позволили выделить 8 типов суточных гидротермических состояний природных комплексов (рис. 2).

1. С – семиаридное мегатермальное с низким содержанием влаги в почве, высокими среднесуточными ($20-25^{\circ}$) и максимальными (более 30°) температурами. Характерно для позднелетнего жаркого периода. Наряду с вегетацией травянистой растительности и подростом под пологом леса, идет усыхание некоторых вегетативных органов древесной растительности, образование мортмасс в форме отпада.
2. ГС – гумидно-семиаридное макротермальное с недостатком влаги в почвах и относительно высокими среднесуточными ($15-20^{\circ}$) и максимальными температурами (более $25-30^{\circ}$). Наблюдается сглаженный суточный ход и стабилизация температурного режима с преимущественным поступлением тепла в почву (за исключением некоторых ночных часов).
3. Г4 – семигумидное мезотермальное со среднесуточными температурами около $15-25^{\circ}$.
4. Г3 – гумидное мезотермальное со среднесуточными температурами около $5-15^{\circ}$, но минимальными температурами, спускающимися в ночные часы до 5° .
5. Г2 – гумидное микротермальное с положительными среднесуточными температурами $5-10^{\circ}$, но с большими перепадами температур – относительно высокими максимумами и минимальными, опускающимися до 0° . Наблюдаются разнонаправленные потоки тепла из почвы в атмосферу и наоборот. Деревья стоят без листьев, солнечные лучи проникают к почве, она нагревается в дневное время и охлаждается в ночное, идет активная вегетация травянистого покрова.
6. Г1 – гумидное микротермальное со среднесуточными температурами $0+5^{\circ}$, но с отрицательными минимумами, приносящими заморозки на почве. Активное разложение подстилки за счет резких колебаний температуры.

7. ГК – гумидно-нивальное криотермальное со среднесуточными температурами менее -5–0°, но положительными максимальными температурами. Образование мерзлого горизонта почв.
8. НК – нивальное криотермальное с низкими отрицательными среднесуточными и максимальными температурами, минимальные температуры опускаются ниже – 15°, образование фрагментарного снежного покрова.

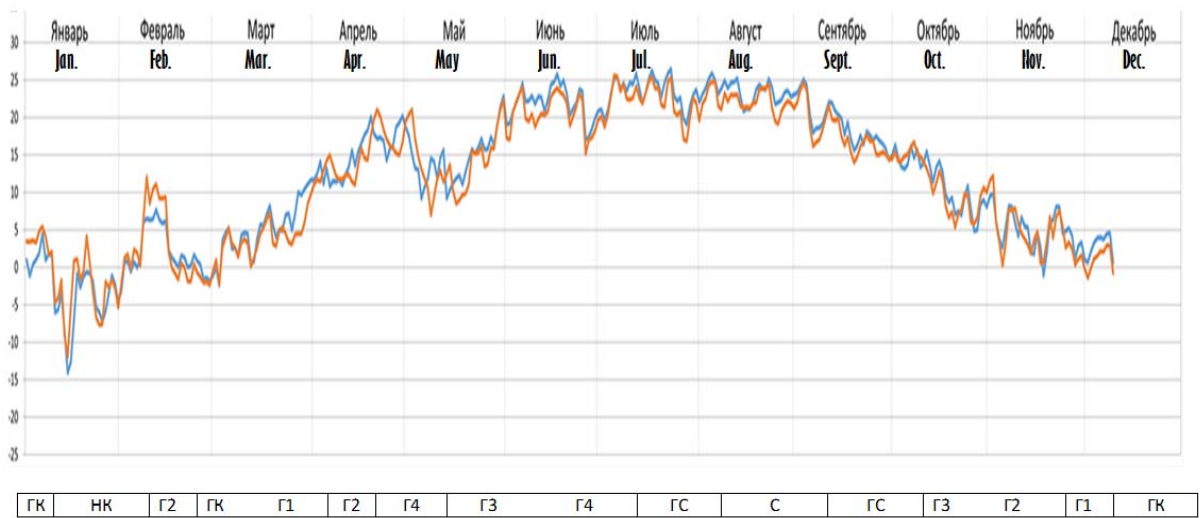


Рисунок 2. Сезонный спектр гидротермических состояний ключевых участков
Сверху показаны графики среднесуточных температур в Черноречье (синий цвет) и Рошни-Чу (красный цвет) за 2024 г. Снизу отложены типы гидротермических состояний
Figure 2. Seasonal spectrum of hydrothermal states of key areas
The graphs of average daily temperatures in Chernorechye (blue) and Roshni-Chu (red) for 2024 are shown at the top. The types of hydrothermal states are shown at the bottom

Стратификация геогоризонтов по отношению к основным потокам вещества и энергии отражает четыре основные тенденции:

1. Создание и усложнение вертикальной структуры (↑). Выделяются два варианта. В весенне-летнее время создание и усложнение вертикальной структуры идет за счет притока тепла, фотосинтеза и накопления углерода. В зимнее время и некоторые переходные периоды появляются геогоризонты, которые связаны с деятельностью холода – вода в состоянии льда (мерзлые геогоризонты в почвах) и снега.
2. Трансформация вертикальной структуры (↔) происходит за счет увеличения или сокращения тех или иных геомасс в геогоризонтах. За счет этого изменяется интенсивность биогеоцикла. В осеннее время наблюдается замедленный фотосинтез, преобладает эмиссия углерода.
3. Разрушение и упрощение вертикальной структуры (↓) сопровождается, как правило, преобладанием эмиссии углерода над стоком.
4. Стабилизация вертикальной структуры (≤≥) характеризуется относительно неизменным составом геомасс и геогоризонтов в условиях слабой интенсивности процессов теплообмена, наблюдается относительно низкая интенсивность экосистемного обмена CO₂.

Таким образом, сезонная структура представлена 8 температурно-влажностными состояниями, которые в сочетании с тенденциями в биогеоцикле создают 15 ландшафтно-экологических состояний, характеризующихся различными условиями биогеоцикла и динамики углерода (табл. 1).

Таблица 1. Ландшафтно-экологические состояния ключевых участков карбонового полигона (Черноречье и Рошни-Чу)

Table 1. Landscape and ecological conditions of key areas of the carbon polygon (Chernorechye and Roshni-Chu)				
Гидротермическое состояние Hydrothermal state	Создание и усложнение вертикальной структуры Creation and complication of vertical structure	Трансформация вертикальной структуры Transformation of the vertical structure	Разрушение и упрощение вертикальной структуры Destruction and simplification of the vertical structure	Стабилизация вертикальной структуры Stabilisation of the vertical structure
Сemiаридное мегатермальное Semi-arid megathermal		С ↔		
Гумидно-сemiаридное макротермальное Humid-semi-arid macrothermal	ГС ↑		ГС ↓	

Семигумидное мезотермальное Semihumid mesothermal	Г4↑	Г4↓
Гумидное мезотермальное Humid mesothermal	Г3↑	Г3↓
Гумидное микротермальное Humid Microthermal	Г2↑	Г2↓
Гумидное микро и криотермальное Humid micro- and cryothermal		Г1⚡ Г1≤≥
Гумидно-нивальное криотермальное Humid-nival cryothermal	ГК ↑	ГК ⚡
Нивальное криотермальное Nival cryothermal	НК ↑	НК ≤≥

Каждое из состояний играет свою роль в жизни природных комплексов. Уникальными (неповторяющимися в течение года) являются семиаридное мегатермальное состояние трансформации структуры и гумидно-семиаридное макротермальное состояние усложнения структуры, отличающиеся недостатком влаги в почве, замедлением фотосинтеза, ускоренной минерализацией мортмасс и потерей углерода в процессе дыхания.

Чередование и длительность состояний является важнейшим показателем хроноструктуры экосистем. Какие состояния предшествовали конкретному состоянию, насколько быстро произошла смена состояний – все это с учетом инертности энергетических сигналов в ландшафте определяет основные параметры биогеоцикла. Эти и другие особенности сезонной хроноструктуры могут быть положены в центр анализа при рассмотрении трансформации биогеоцикла под влиянием изменений глобального климата и выраженности этих изменений в регионе.

Связь климатических данных в течение сезонов с динамикой фито- и мортмасс

Как показали замеры фито- и мортмасс в Черноречье (рис. 3), динамика древесной фитомассы, мортмассы и травянистой фитомассы существенно различаются в разные сезонные состояния. Древесная фитомасса стволов – относительно стабильный фактор. Она достигает около 130 т/га и может быть измерена по годичным кольцам прироста. На текущем этапе проекта такие исследования, базирующиеся на дендрохронологическом анализе, не проводились. Расчетным способом было выявлено, что основной сезонный прирост приходится на конец мая – первую половину лета, когда появляются листья (максимальная масса достигает 3,25 т/га) и веток (около 30 т/га). С учетом только годичного прироста тонких веток общегодовой прирост фитомассы за счет листьев и веток не превышает 15 т/га. Вычисление прироста корней не представлялось возможным в рамках данных исследований. Пик травянистой фитомассы (около 4 т/га) достигался в первой половине июля (гумидно-семиаридное макротермальное состояние усложнения вертикальной структуры), затем шел спад, что связано с недостатком влаги и усыханием верхних горизонтов

почвы. Спад был несколько замедленным, что связано с растянутостью гумидных мезо- и микротермальных состояний. При этом вследствие опада листьев освещенность и относительная высокая влажность под пологом леса благоприятствовали второму пику роста травянистой растительности. Минимум травянистой фитомассы (0,1 т/га) приходился на нивально-криотермальное состояние. В течение гумидно-нивального криотермального, гумидных микро и криотермального, микротермального и мезотермального состояний шел медленный рост травянистой фитомассы. Отмечается крайняя неравномерность латеральной структуры травянистого растительного покрова вследствие неодинакового прогрева почвы. Первыми появляются куртины черемши и только затем начинает появляться разнотравье и злаки.

Кривая мортмассы в первую половину года зеркальна кривой травянистой фитомассы. Максимум мортмассы приходится на границу гумидных и семигумидных мезотермальных состояний. Именно в это время интенсивная солнечная радиация приводит к резкому уменьшению влажности на поверхности почв, наблюдается отмирание сухих веток деревьев и подраста. Большая доля отпада приводит к тому, что мортмасса достигает более 20 т/га. Затем наблюдается интенсивное разложение подстилки и ветоши, что приводит к уменьшению мортмассы. Небольшой второй пик мортмассы приходится на гумидные мезо- и микротермальные состояния упрощения структуры.

Максимальная фитомасса стволов в Рошни-Чу достигает около 290 т/га, что более чем в 2 раза превышает таковую в Черноречье. Основной годичный прирост фитомассы приходится на листву и ветки. Максимальная масса листвы по расчетным данным достигает более 7 т/га и веток (около 70 т/га). С учетом только годичного прироста тонких веток общегодовой прирост фитомассы за счет листьев и веток не превышает 30 т/га.

Пик травянистой фитомассы (около 0,2 т/га) приходится на октябрь, когда господствуют гумидные мезотермальные состояния упрощения и разрушения структуры. В остальное время травянистые фитомассы не превышают 0,1 т/га. В травянистом покрове преобладают куртины злаков, которые вегетируют даже в зимние состояния.

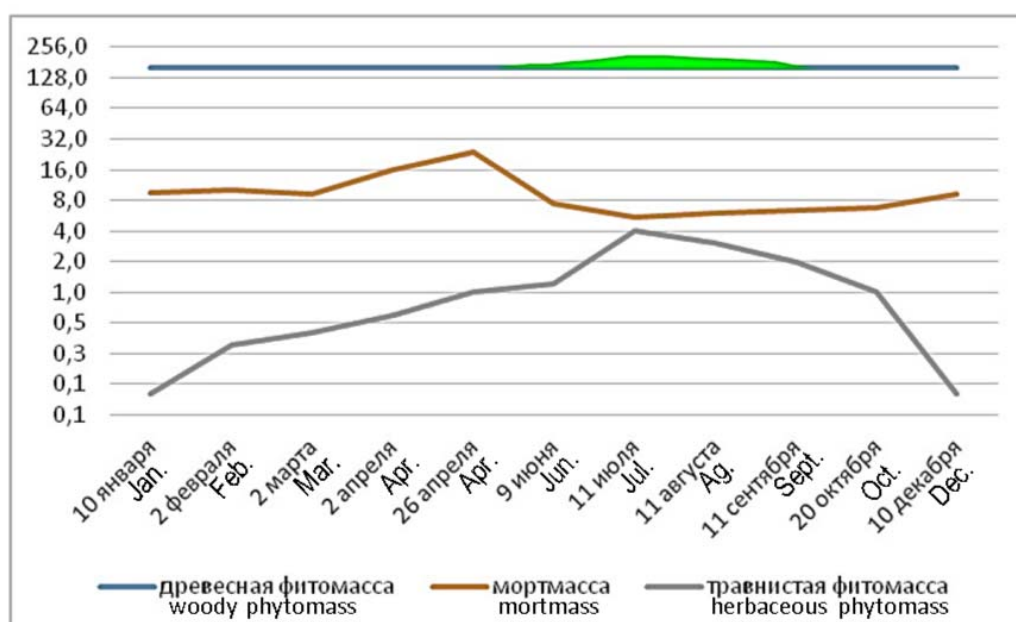


Рисунок 3. Динамика фито- и мортмассы в Черноречье (т/га, в перерасчете на сухой вес)

Ось значений фитомассы дана в логарифмическом масштабе. Зеленым цветом указаны фитомассы листьев

Figure 3. Dynamics of phyto- and mortmass in Chernorechye (t/ha, in terms of dry weight)

The axis of phytomass values is given in logarithmic scale. Leaf phytomass is shown in green

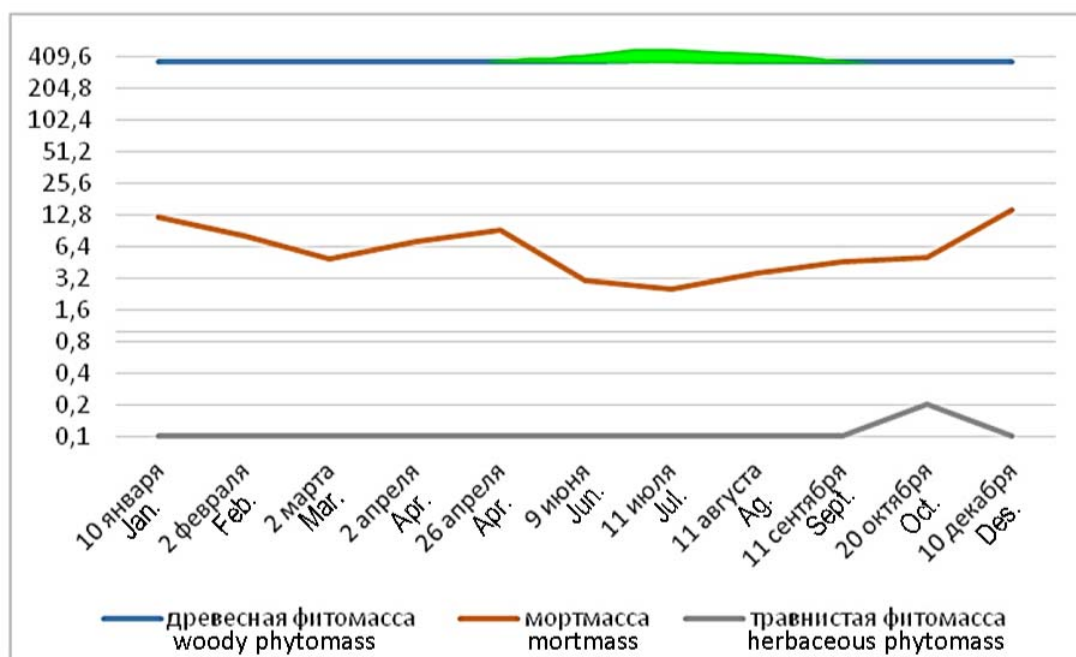


Рисунок 4. Динамика фито- и мортмассы в Рошни-Чу (т/га, в перерасчете на сухой вес).

Ось значений фитомассы дана в логарифмическом масштабе. Зеленым цветом указаны фитомассы листьев

Figure 4. Dynamics of phyto- and mortmass in Roshni-Chu (t/ha, in terms of dry weight).

The axis of phytomass values is given in logarithmic scale. Leaf phytomass is shown in green

Кривая мортмассы практически не зависит от динамики травянистой фитомассы. Максимум мортмассы (около 13 т/га) приходится на нивально-криотермальные состояния зимнего периода, когда накапливается значительный слой подстилки из опавших листьев. По мере увеличения температуры подстилка постепенно разлагается. Минимум приходится на середину лета (около 3 т/га), когда господствуют семигумидные макротермальные и семиаридные мегатермальные состояния. Далее количество мортмассы постепенно растет. Пик разложения мортмассы, таким образом, приходится на весенний период.

Сравнивая оба участка (рис. 5), обращает на себя внимание тот факт, что несмотря на значительный перевес в древесной фитомассе в Рошни-Чу, мортмасса на этом участке меньше, чем в Черноречье. Это объясняется более разновозрастным лесом в Черноречье с подлеском и подростом, который служит дополнительным источником отпада. В Рошни-Чу источником мортмассы являются в основном листья, которые при гумификации и минерализации возвращаются в атмосферу с летучими газами и частично пополняют содержание гумуса в почве.

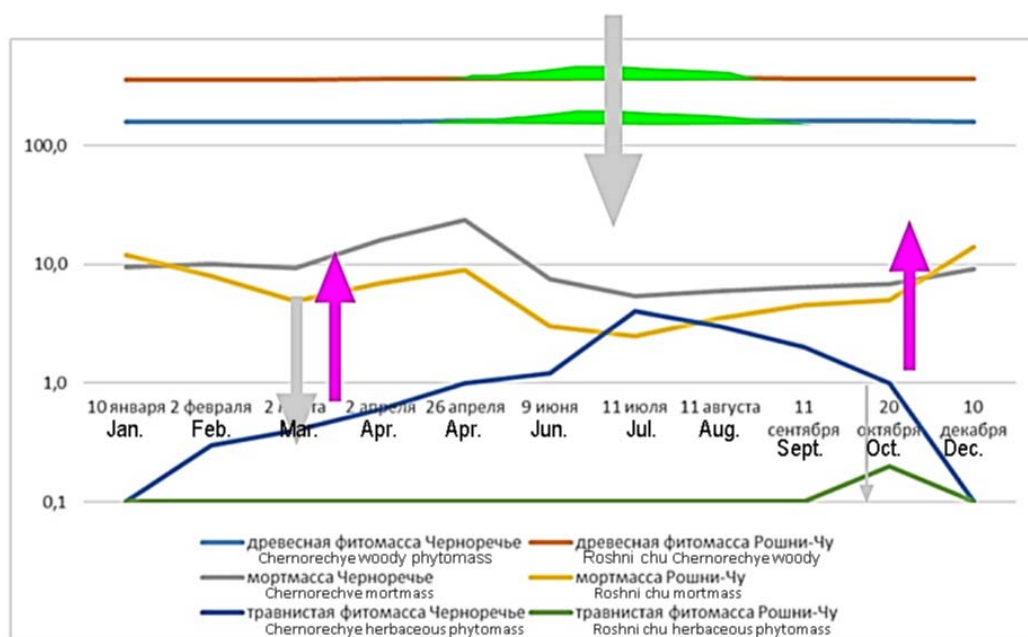


Рисунок 5. Динамика фитомассы и мортмассы (т/га, в перерасчете на сухой вес)

на участке Черноречья и Рошни-Чу

Ось значений фитомассы дана в логарифмическом масштабе. Зеленым цветом указаны фитомассы листьев.

Стрелка вверх обозначает эмиссию, вниз – сток

Figure 5. Dynamics of phytomass and mortmass (tons per hectare, in terms of dry weight) in the Chernorechye and Roshni-Chu area

The axis of phytomass values is given in logarithmic scale. Leaf phytomass is shown in green.

The upward arrow denotes emission, the downward arrow denotes runoff

Рассматривая сезонную динамику фито- и мортмассы на двух ключевых участках, можно заключить, что в Рошни-Чу наблюдается относительно простой биогеоцикл. Мертвопокровные широколиственные леса с умеренным антропогенным воздействием характеризуются периодом активного накопления углерода в результате фотосинтеза (гумидные и семигумидные мезо и макротермальные состояния) и периодом преимущественного возвращения углерода в атмосферу при дыхании почв, разложении подстилки в весенние и осенние состояния. Более сложно устроена периодичность стока и эмиссии углерода в Черноречье. Здесь в биогеоцикле наблюдаются разнонаправленные тренды в динамике углерода. Относительный баланс между стоком и эмиссией углерода наблюдается в весенне-летние гумидные и семигумидные мезо- и макротермальные состояния, которые переходят в семиаридные мегатермальные состояния с преобладанием эмиссии углерода над стоком за счет активного разложения мортмасс. В обоих участках можно выделить гумидные и нивальные криотермальные состояния относительно покоя, когда экосистемный обмен CO_2 минимальный.

К разработке модели биогеоцикла

Биогеоцикл ключевых участков является одним из трех важнейших составляющих функционирования наряду с трансформацией солнечной энергии и влагооборота. На верхнюю границу природного комплекса в летний солнечный день поступает примерно 350 Вт/м кв. в Черноречье (рис. 6). В верхнем фотосинтетически активном горизонте наблюдается основное поглощение суммарной радиации. К нижней границе проникает около трети радиации. За счет турбулентного теплообмена с атмосферой, затрат энергии на

фотосинтез и транспирацию теряется до 10–20 % энергии (в зависимости от погодной ситуации этот показатель сильно колеблется). В летние сезоны, когда лесные экосистемы имеют геогоризонт листьев, поверхности почвы достигает около 5–7 % суммарной радиации. Поэтому теплообмен с почвой относительно невелик, он резко увеличивается в весенние и осенние состояния. Так, по данным наблюдений в апреле разница температур на высоте 0,5 и 2 м. может достигать 10 град, что свидетельствует о значительном потоке тепла в системе почвы-воздух.

В переходные от зимы к лету гумидные мезотермальные и микротермальные состояния на поверхности почвы находилось от 2 до 9 т/га мортмассы (в зависимости от латеральной структуры и места взятия пробы) в виде стволов поваленных деревьев и другого мелкого опада (здесь и далее приводится сухой вес). Величина опада в данном состоянии составляла 2,5 т/га (в разных пробах от 2 до 3 т/га). Подстилка достигала от 8 до 11 т/га. Таким образом, общее количество мортмассы в гумидные мезотермальные состояния достигала от 12 до 23 т/га.

В это же состояние на участке широколиственного леса в низкоросле (Рошни-Чу), мортмасса опада составляла 1,2 т/га, опада – 3,4 т/га и подстилки – 4,4 т/га. Всего мортмасса на этом участке составляла 10 т/га, что существенно меньше, чем в Черноречье. Это связано как с особенностями строения этих природных комплексов, так и от скорости разложения мортмасс.

В летнее время количество мортмассы в Черноречье уменьшается почти в 2 раза, а в Рошни-Чу – почти в три раза. Это происходит за счет разложения в основном опада и подстилки. Органическое вещество мортмассы подвергается разложению со стороны гетеротрофов, которые по разным подсчетам достигают

до 0,5–0,7 т/га (учитывая также ризофитов и детритофитов) (см., например, [11]). Для их жизнедеятельности большое значение имеют благоприятные высокие температуры и относительно высокая влажность. Уже к концу лета влажность падает, что несколько снижает активность гетеротрофов. В Черноречье в верхнем гумусовом горизонте (0–12 см) содержание гумуса составляет 6,9 %. По некоторым данным, масса гумуса в почве в горных широколиственных лесах примерно равна надземной фитомассе [9].

Гумификация и минерализация мортмасс также сильно различается по сезонам и на разных участках. Как показали наши исследования, запасы органического вещества в мортмассе и, следовательно, углерода резко уменьшаются от весны к лету. К тому же под воздействием минерализации количество мортмассы быстро уменьшается при переходе из опада в подстилку и далее в почву. По некоторым оценкам подавляющая часть мортмассы (до 98 %) возвращается в атмосферу за счет минерализации [12].

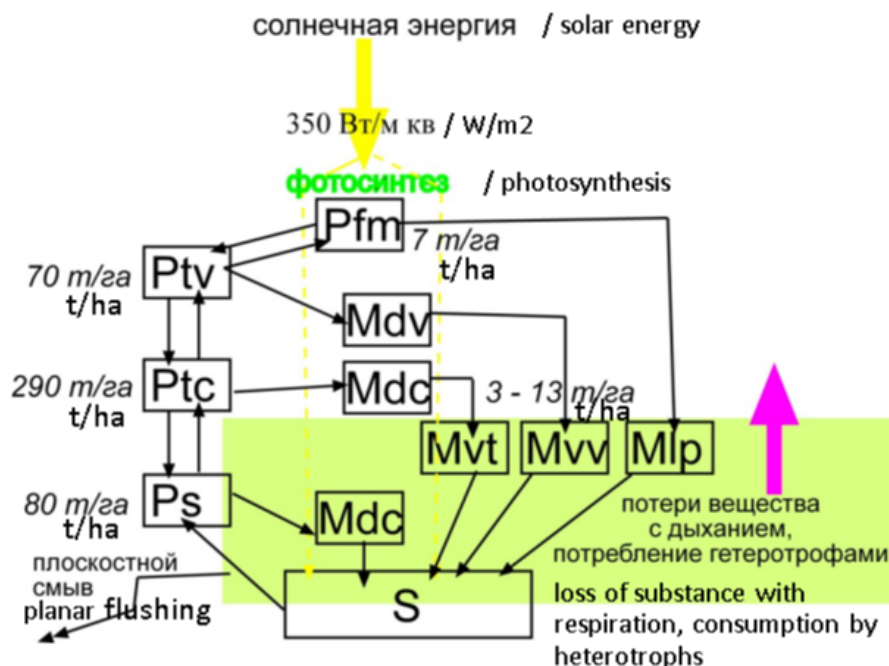


Рисунок 6. Схематическая модель биогеоцикла на участке Рошни-Чу (без учета травянистой фитомассы)

Знаками показаны геомассы: P – фитомасса, Ptc – стволы кронообразующих деревьев, Ptv – ветки деревьев и стволы кустарников, Pfm – мезофитные листья, Pi – травянистая фитомасса, Ps – корни; M – мортмасса, Md – сухостой, Mdv – отмершие ветки, Mvt – отпад в виде стволов деревьев, Mvv – валежник, Mlt – ветошь, Mlp – свежая подстилка, Mo – мор, полуразложившаяся подстилка, Ms – отмершие корни. S – педомасса. Значение солнечной энергии в летнее время. Значения фито- и мортмасс указаны в т/га в перерасчете на сухой вес

Figure 6. Schematic model of the biogeocycle in the Roshni-Chu area (excluding herbaceous phytomass)

Signs indicating geomasses: P – phytomass, Ptc – trunks of crown-forming trees, Ptv – tree branches and shrub trunks, Pfm – mesophytic leaves, Pi – herbaceous phytomass, Ps – roots, M – mortmass, Md – dead wood, Mdv – dead branches, Mvt – waste in the form of tree trunks, Mvv – fallen wood, Mm – rags, Mlp – fresh litter, Mo – dead, semi-decomposed litter, Ms – dead roots. S – pedomass. The value of solar energy in summer. The values of phyto- and mortmass are indicated in t/ha, recalculated to dry weight

Принципиальная модель биогеоцикла подчеркивает две важные особенности:

1. Ведущую роль механизма разложения мортмассы. Относительно низкие значения наземной фитомассы в Черноречье по сравнению с Рошни-Чу (различаются почти в два раза) вызваны менее благоприятными условиями роста деревьев, образованием сухостоя и отпада. Причины этому как в неустойчивом увлажнении корневых систем (глубокое проникновение до уровня грунтовых вод только у части деревьев), так и в относительно низкой продуктивности. Так, содержание фосфора в почвах Черноречья крайне низкое 0,8 мг/100 г, в то время как в Рошни-Чу оно достигает 15 мг/100 г.

2. Слабо исследуемой областью является изучение интенсивности трансформации органического вещества при переходах от накопления углерода к

трансформации углерода в различных фракциях мортмассы, его участия в дыхании гетеротрофов и поступлении в почву. Скорости минерализации и гумификации сильно зависят от метеоклиматических условий. С точки зрения хроноструктуры ландшафта важным является также предопределенность переходов от одного состояния к другому, длительность предыдущих состояний, резкость переходов. Эти аспекты так или иначе затрагивают этологию ландшафта и будут исследованы на следующем этапе работ.

Другое важное наблюдение для понимания экосистемного обмена CO₂ заключается в установлении связи продуктивности почв и запасов надземной мортмассы. В случае Черноречья наблюдается относительно большое количество мортмассы, однако относительно низкое содержание гумуса и азота в

почве. Пониженная активность почв не способствует росту деревьев. Да и пополнение гумуса в почве происходит крайне медленно, подавляющее большинство мортмассы разлагается на летучие соединения и газы.

Как показали наблюдения за сезонными состояниями ключевых комплексов и динамикой фито- и мортмассы, возможное влияние на биогеоцикл тесно связано с утилизацией отдельных фракций мортмассы. На трех участках – в Черноречье, в Рошни-Чу и на карбоновой ферме – наблюдаются различные условия функционирования и динамики природных комплексов, что дает основание для реализации трех сценариев.

1. Преимущественная эмиссия углерода за счет быстрой минерализации мортмасс с частичным накоплением углерода в почве наблюдается в широколиственных предгорно-равнинных лесах с недостатком увлажнения в летние сезоны (Черноречье). Разновозрастный лес находится на грани экологического оптимума, осадков в вегетационный сезон не хватает, часть древесной растительности быстро усыхает и пополняет мортмассу. В то же время эта мортмасса в большинстве своем при разложении теряется в виде летучих соединений. В почву попадает лишь незначительная часть. Этот сценарий, таким образом, не является эффективным и требует оптимизации биогеоцикла.

2. Другая ситуация наблюдается в Рошни-Чу, где определенная часть фитомассы депонируется в стволах, ветках и корнях деревьев. Более растянутый период минерализации мортмассы позволяет ей пополнять гумусовый горизонт почв. Однако в условиях отсутствия дерновины в лесах часть верхнего гумусового горизонта и подстилки уносится плоскостным смывом. Тем не менее, сравнивая запасы надземной фитомассы, которые почти в два раза превышают таковую в Черноречье, можно сказать, что данный вариант баланса углерода более оптимален.

3. Возникает вопрос, какие оптимальные альтернативные сценарии можно предложить для Чеченской равнины, в большей степени безлесной. Аналогом таких потенциальных ареалов является участок карбоновой фермы в окрестностях Грозного. Попытки посадки деревьев в 2021 г. (*Salix Tortuosa*) оказались неудачными в связи с жаркой и сухой погодой. Здесь условия вряд позволят реализовать сценарий по типу Рошни-Чу. Но и сценарий Черноречья, как показывает анализ этого участка, не является эффективным. На наш взгляд, наиболее оптимальным вариантом экосистемы с эффективными природными и квазиприродными сценариями экосистемного обмена CO₂ на основе более оптимальной трансформации (утилизации) мортмассы может стать конструирование лесостепных (саваноидных) природных комплексов, предполагающих разреженные кустарниковые и лугостепные мелколесья с деревьями, имеющими глубокие корни и приспособленными к длительным периодам засухи. В таких условиях умеренный выпас и сенокошение позволят сократить объемы накопления мортмассы и эмиссии углерода, а также потери за счет других летучих соединений. Возможно повышение активности почв (за счет дополнительного увлажнения и повышения соотношения углерода к азоту), что позволит увеличить депонирование углерода в почву.

ВЫВОДЫ

1. Анализ хода температуры, влажности и осадков за 2022–2024 годы, ландшафтно-фенологические и ландшафтно-геофизические обследования ключевых участков позволили выделить 8 типов суточных гидротермических состояний природных комплексов, которые в сочетании с тенденциями в биогеоцикле создают 15 ландшафтно-экологических состояний, характеризующихся различными условиями биогеоцикла и динамики углерода. Каждое из состояний играет свою роль в жизни природных комплексов. Уникальными (неповторяющимися в течение года) являются состояния: семиаридное мегатермальное трансформации структуры и гумидно-семиаридное макротермальное усложнения структуры, отличающиеся недостатком влаги в почве, замедлением фотосинтеза, ускоренной минерализацией мортмассы и эмиссией углерода.

2. Сезонная динамика фито- и мортмассы на ключевых участках различается. В Рошни-Чу наблюдается относительно простой биогеоцикл. Мертвопокровные широколиственные леса с умеренным антропогенным воздействием характеризуются периодом активного накопления углерода в результате фотосинтеза (гумидные и семигумидные мезо и макротермальные состояния) и периодом преимущественной эмиссии углерода при дыхании почв, разложении подстилки в весенние и осенние состояния. В Черноречье в биогеоцикле наблюдаются разнонаправленные тренды в динамике углерода. Относительный баланс между аккумуляцией и выбросом углерода наблюдается в весенне-летние гумидные и семигумидные мезо- и макротермальные состояния, которые переходят в семиаридные мегатермальные состояния с преобладанием эмиссии углерода над стоком за счет активного разложения мортмасс. В обоих участках можно выделить гумидные и нивальные криотермальные состояния относительно покоя, когда динамика углерода замедленная.

3. Важную роль для обеспечения положительного баланса в биогеоцикле играет мортмасса. Относительно высокие значения наземной мортмассы в Черноречье вызваны менее благоприятными условиями роста деревьев, образованием мортмассы в виде сухостоя и отпада. Причины этому как в неустойчивом увлажнении корневых систем, так и в относительно низкой продуктивности почв. Учитывая, что скорости минерализации и гумификации сильно зависят от метеоклиматических условий, нужны более детальные исследования интенсивности трансформации органического вещества при переходах от накопления углерода к трансформации углерода в различных фракциях мортмассы, участия в дыхании гетеротрофов и поступлении гумуса и минеральных веществ в почву.

4. Наблюдения за сезонной динамикой ключевых комплексов позволили обозначить возможные пути влияния на биогеоцикл с целью повышения положительного баланса углерода. В настоящий момент наблюдаются три сценария. Преимущественная потеря углерода за счет быстрой минерализации мортмасс с частичным накоплением углерода в почве наблюдается в широколиственных предгорно-равнинных лесах с недостатком увлажнения в летние сезоны (Черноречье). В Рошни-Чу определенная часть фитомассы депонируется в стволах, ветках и корнях деревьев, а более растянутый период минерализации

мортмассы позволяет пополнять почвы гумусом и минеральными веществами. Что касается участка карбоновой фермы, наиболее оптимальным вариантом для повышения депонирования углерода может стать конструирование лесостепных (саваноидных) природных комплексов в виде разреженных кустарниковых и лугостепных мелколесий с деревьями, имеющими глубокие корни и приспособленными к длительным периодам засухи.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ имени 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 state assignment of the M.D. Millionshchikov GGNTU, FZNU-2024-0004, Comprehensive Study of Greenhouse Gas Flows in Natural and Anthropogenically Disturbed Landscapes of the Chechen Republic and the Development of Scientifically Based Recommendations for the Restoration of the Bioresource Potential of Disturbed Lands.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Winkler K., Yang H., Ganzenmüller R., Fuchs R., Ceccherini G., Duveiller G., Grassi G., Pongratz J., Bastos A., Shvidenko A., Araza A., Herold M., Wigneron J.-P., Ciais P. Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink // *Communications Earth Environment*. 2023. V. 4. N 1. Article number: e237. DOI: 10.1038/s43247-023-00893-4
2. Babalola T.S., Omoju O.J., Fasina A.S., Ajayi S.O. Soil Carbon Sequestration in Different Land Use Types // *International Journal of Plant & Soil Science*. 2024. V. 36. N 12. P. 16–25. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i125178>
3. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2021. Т. 6. N 3 (25). С. 35–47. DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004
4. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Алахвердиев Ф.Д. Комплексный подход к оценке изменений в землепользовании и их влияния на динамику углерода в горных ландшафтах Чеченской Республики // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2021. Т. 15. N 4. С. 39–52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
5. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. М.: Мысль, 1986. 182 с.
6. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М. Высшая школа, 1991. 366 с.
7. Бобренко И.А., Дрофа О.В., Гоман Н.В., Бобренко Е.Г., Коржова Л.В., Кадермас И.Г., Троценко И.А. Сезонная динамика эмиссии диоксида углерода разновозрастными залежами в зависимости от природной зоны Западной Сибири // *Вестник Омского ГАУ*. 2024. N 4 (56). С. 26–33.
8. 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. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-17>
9. Беручашвили Н.Л. Методика ландшафтно-географических исследований и картографирования состояний природно-территориальных комплексов. Тбилиси: Изд-во Тбилисск. Ун-та, 1983. 196 с.
 10. Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
 11. Исаков Ю.А., Зимица Р.П., Панфилов Д.В. Животный мир // *Кавказ*. М: Наука, 1966. С. 256–304.
 12. Ведрова Э.Ф., Мухомотова Л.В., Метелева М.К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах // *Лесоведение*. 2018. N 1. С. 24–36.

REFERENCES

1. Winkler K., Yang H., Ganzenmüller R., Fuchs R., Ceccherini G., Duveiller G., Grassi G., Pongratz J., Bastos A., Shvidenko A., Araza A., Herold M., Wigneron J.-P., Ciais P. Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink. *Communications Earth & Environment*, 2023, vol. 4, no. 1, article number: e237. DOI: 10.1038/s43247-023-00893-4
2. Babalola T.S., Omoju O.J., Fasina A.S., Ajayi S.O. Soil Carbon Sequestration in Different Land Use Types. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2024, vol. 36, no. 12, pp. 16–25. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i125178>
3. Kerimov I.A., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon fiber landfill of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*, 2021, vol. 6, no. 3 (25), pp. 35–47. (In Russian) DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004
4. Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Alakhverdiev F.D. An integrated approach to assessing changes in land use and their impact on carbon dynamics in mountain landscapes of the Chechen Republic. *Izvestiya Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 39–52. (In Russian) DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
5. Beruchashvili N.L. *Chetyre izmereniya landshafta* [Four dimensions of the landscape]. Moscow, Mysl Publ., 1986, 182 p. (In Russian)
6. Isachenko A.G. *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie* [Landscape science and physico-geographical zoning]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 366 p. (In Russian)
7. Bobrenko I.A., Bustard O.V., Homan N.V., Bobrenko E.G., Korzhova L.V., Kadermas I.G., Trotsenko I.A. Seasonal dynamics of carbon dioxide emissions from deposits of different ages depending on the natural zone of Western Siberia. *Vestnik Omskogo GAU* [Bulletin of the Omsk State Agrarian University]. 2024, no. 4 (56), pp. 26–33. (In Russian)
8. Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Gagaeva Z.Sh. Seasonal carbon conditions and dynamics at key sites of a carbon landfill in the Chechen Republic. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 169–179. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-17>
9. Beruchashvili N.L. *Metodika landshaftno-geograficheskikh issledovaniy i kartografirovaniya sostoyaniy prirodno-territorial'nykh kompleksov* [Methodology of landscape-geographical research and mapping of states of natural-territorial complexes]. Tbilisi, Tbilisi University Publ., 1983, 196 p. (In Russian)
10. Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of complex physical and geographical research]. Moscow, Moscow State University Publ., 1997, 320 p. (In Russian)

11. Isakov Yu.A., Zimina R.P., Panfilov D.V. *Zhivotnyi mir. Kavkaz* [The animal world. The Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 256–304. (In Russian)

12. Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Meteleva M.K. Transformation of litter organic matter in forest crops. *Lesovedenie* [Forestry science]. 2018, no. 1, pp. 24–36. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

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

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTERESTS 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. Gairabekov <https://orcid.org/0000-0001-6358-0477>

Любовь Ш. Махмудова / Lyubov Sh. Makhmudova <https://orcid.org/0000-0002-3104-9275>