

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 911.5.6

DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.65.012

Оригинальная статья

## Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем

А. Н. Гуня<sup>1, 2</sup>, У. Т. Гайрабеков<sup>2, 3</sup>, З. Ш. Гагаева<sup>2, 3</sup><sup>1</sup>Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29, e-mail: a. n. gunya@igras. ru;<sup>2</sup>Чеченский государственный университет, Россия, 364024, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. А. Шерипова, 32;<sup>3</sup>Академия наук Чеченской Республики, Россия, 364024, Чеченская Республика, г. Грозный, бульвар М. Эсамбаева

Статья поступила: 18.07.2022, доработана: 23.08.2022, одобрена к публикации: 30.08.2022

**Резюме: Актуальность работы.** Различия в динамике углеродного баланса между горными экосистемами высотных поясов и внутри них огромные. Это обусловлено климатом и рельефом с его с высотными, экспозиционными, субстратными и другими различиями. Точечные измерения углеродного баланса нуждаются в обеспечении репрезентативности экстраполяции измерений. **Целью работы** является выявление ландшафтной структуры на разных уровнях дифференциации для последующей оценки условий баланса углерода. В качестве ключевого участка взяты высокогорные ландшафты на карбоновом трансекте в Чеченской Республике. **Методы работы.** Основными методами послужили полевое ландшафтное картографирование и профилирование. Были применены также результаты классификации ландшафтного покрова по снимку Sentinel-2, которые были проверены в ходе экспедиционных обследований на местности. При этом использовались методы геоинформационного анализа. Расчеты фитомассы проводились на основе полевых замеров с корреляцией по литературным данным. **Результаты работы.** Как показали исследования на профиле и на ключевом участке, на сравнительно небольшом расстоянии условия динамики углерода существенно меняются. Это связано с изменениями условий теплообмена, плодородием почв, экзогенными процессами и антропогенной нагрузкой. Картографирование ландшафтной структуры является важным шагом в определении границ разных условий, определяющих динамику углерода. При этом информативной основой ландшафтного картографирования может выступать схема дешифрирования и классификации снимков высокого разрешения. Контрастность в условиях динамики углерода сохраняется на разных уровнях ландшафтной дифференциации: от регионального к локальному. Наиболее контрастными границами динамики углерода на высокогорном участке карбонового полигона Чеченской Республики выступают ландшафтные границы между типами ландшафтов: горно-луговым, горно-лесным, горно-лесолуговым, горно-луговостепным. В горно-лесных широколиственных лесах содержится больше органического углерода в надземном профиле (более 100 т / га), в то время как в горно-степных и горно-луговых ландшафтах накапливается органический углерод в почвах (десятки т / га). Нарушение естественного покрова приводит к снижению интенсивности баланса углерода.

**Ключевые слова:** горы, ландшафтная структура, дифференциация, баланс углерода.**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания ГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова: № FZNU-2021-0011 «Изучение секвестрационного и эмиссионного потенциала карбонового полигона «ЭкоГрозный» и разработка научно-обоснованных технологий декарбонизации (на примере Чеченской Республики)».**Для цитирования:** Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Гагаева З.Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 170-181. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.65.012.

DOI: 10.46698/VNC.2022.48.65.012

Original paper

## Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems

A. N. Gunya <sup>1, 2</sup>, U. T. Gairabekov <sup>2, 3</sup>, Z. Sh. Gagaeva <sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetny per., Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: a. n. gunya@igras.ru;

<sup>2</sup>Chechen State University, 32 A. Sheripov Str., Grozny 364024, Chechen Republic, Russian Federation;

<sup>3</sup>Academy of Sciences of the Chechen Republic, 13 M. Esambaev Boulevard, Grozny 364024, Chechen Republic, Russian Federation

Received: 18.07.2022, revised: 23.08.2022, accepted: 30.08.2022

**Abstract: Relevance.** Differences in the dynamics of the carbon balance between mountain ecosystems of altitudinal belts and within them are enormous. This is due to the climate and topography with its altitudinal, exposure, substrate and other differences. Point measurements of the carbon balance need to ensure that the extrapolation of measurements is representative. **The aim** of the work is to identify the landscape structure at different levels of differentiation for the subsequent assessment of carbon balance conditions. Alpine landscapes on the carbon transect in the Chechen Republic were taken as a key site. **Methods.** Field landscape mapping and profiling served as the main methods. The results of the landscape cover classification based on the Sentinel-2 image, which were verified during field surveys, were also applied. At the same time, methods of geoinformation analysis were used. Phytomass calculations were carried out on the basis of field measurements with correlation according to literature data. **Results.** As studies on the profile and in the key area showed, at a relatively short distance, the conditions of carbon dynamics change significantly. This is due to changes in the conditions of heat and moisture exchange, soil fertility, exogenous processes and anthropogenic load. Mapping landscape structure is an important step in delimiting the different conditions that drive carbon dynamics. At the same time, the scheme for deciphering and classifying high-resolution images can serve as an informative basis for landscape mapping. Contrast under conditions of carbon dynamics persists at different levels of landscape differentiation: from regional to local. The most contrasting boundaries of carbon dynamics in the high-mountain section of the carbon polygon of the Chechen Republic are the landscape boundaries between landscape types: mountain-meadow, mountain-forest, mountain-forest-meadow, mountain-meadow-steppe. Mountain-forest broad-leaved forests contain more organic carbon in the above-ground profile (more than 100 t/ha), while in mountain-steppe and mountain-meadow landscapes organic carbon accumulates in soils (tens of t/ha). Disruption of the natural cover leads to a decrease in the intensity of the carbon balance.

**Keywords:** mountains, landscape structure, differentiation, carbon balance.

**Acknowledgment:** *The work was carried out within the framework of the state task of Academician M.D. Millionshchikov GSOTU: No. FZNU-2021-0011 "Study of sequestration and emission potential of the carbon landfill "EcoGrozny" and development of scientifically based decarbonization technologies (on the example of the Chechen Republic)".*

**For citation:** Gunya A. N., Gairabekov U. T., Gagaeva Z. Sh. Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 170-181. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.65.012.

## Введение

Горные территории занимают более половины площади России. Однако, в современных аналитических обзорах по углеродной тематике горы практически не упоминаются [Кудеяров, 2018; Курбатова, 2020]. Международные исследования динамики карбона в горах опираются в большинстве своем на детальные точечные исследования [Abalori et al., 2022], реже затрагивают высотные зоны [Garten et al., 2004]. Для оценки баланса углерода в таких сложных регионах, как горы требуются знания об основных границах, характеризующих неоднородность процессов накопления и миграции углерода в пространстве и времени [Гуныя и др., 2021; Гуныя, Гакаев, 2021; Jakšić et al., 2021; Karchegani et al., 2012]. Часто на сложную мозаику экосистемной организации в горах накладывается антропогенная деятельность, еще больше усложняющая картину пространственных вариаций динамики углерода [Amanuel et al., 2018, Ewane, 2020, Joeletal., 2016].

В начале исследования требуется упорядочить и создать некую упрощенную модель физико-географической дифференциации, отражающую основные типы условий и границы между ними, разделяющие те или иные особенности баланса углерода в экосистемах и ландшафтах. Какие алгоритмы создания таких моделей могут подойти? Развитие методов дистанционного зондирования и получение снимков местности показали, что чрезвычайное разнообразие природы гор сложно типизировать. Имеющиеся классификационные схемы ориентированы в основном на типологию растительного покрова, что отражает лишь одно сезонно-погодное состояние, вовсе не обязательно являющееся репрезентативным для характеристики картографируемых природных систем в целом. Полевое картографирование весьма трудоемко, крупномасштабные карты физико-географической дифференциации имеются лишь на отдельные участки территории, а экстраполяция полученных закономерностей на другие территории требует проверенных алгоритмов. Надежда на геоинформационные методы вполне оправдана, однако получаемый с помощью ГИС массив данных настолько большой, что превышает возможности научных коллективов и опять же ставит задачи по выработке алгоритмов упрощения и упорядочения. Погоня за новыми данными, чему способствует развитие методов ГИС и дистанционного зондирования, получение снимков земной поверхности высокого и сверхвысокого разрешения, принципиально не решает проблему упорядочения данных с дальнейшим выходом на пользователя и решения конкретных задач, связанных с оценкой баланса углерода.

Один их выходов из этого проблемного круга, связанного с накоплением и переработкой большого объема данных, может лежать в использовании ландшафтного подхода, основанного на сочетании точных методов и опыта исследователя в процессе упрощения и упорядочения картины природной дифференциации. Ландшафт представляет собой сложную структурированную и хорошо организованную систему, не сводимую к простому сочетанию компонентов. Ландшафтный подход в изучении горных территорий достаточно хорошо разработан в трудах классиков горного ландшафтоведения (Н. А. Гвоздецкий, Г. П. Миллер, Н. Л. Беручашвили и др.). В основе наиболее известного и детально разработанного инструмента картографирования горных ландшафтов лежали представления о типологическом понимании природных комплексов Н. А. Гвоздецкого.

Под ландшафтной дифференциацией следует понимать, с одной стороны, процесс выделения и упорядочения природных комплексов разного ранга и типа, а, с

другой, зафиксированный в определенный момент времени результат природной дифференциации, предполагающий пространственную визуализацию выявленных природных структур. Ландшафтное картографирование как один из основных методов упорядочения природных комплексов, включает саму идентификацию природных комплексов, выявление пространственной организации и иерархии. Часто исследователь останавливается на каком-то одном варианте ландшафтной дифференциации, соответствующем задачам исследования. Нередко существуют мнения о том, что, сколько исследователей, столько вариантов ландшафтной карты. Представляется, что различия могут быть, однако главные структуры и границы будут похожими у разных исследователей. В горах к таким, более или менее однозначно выделяемым границам, относятся высотно-зональные границы.

Ландшафтная структура – отражение сложного сочетания разных факторов. Ландшафтный выдел характеризует пространство жизнедеятельности определенного типа и ранга. Иерархия факторов отражает разную «силу» природных границ. Не существует единой иерархии – она может различаться для разных регионов и даже местностей. Ландшафтную организацию выявляют, как правило, на основе опыта полевого исследования. Выявление ландшафтной дифференциации позволяет сравнить уровни природной иерархии с масштабами человеческих действий.

**Целью работы** является выявление ландшафтной структуры на разных уровнях дифференциации для последующей оценки условий баланса углерода. В качестве ключевого участка взяты высокогорные ландшафты на карбоновом трансекте в Чеченской Республике.

### Методы исследований

В основу работы положены исследования ландшафтной дифференциации по профилю, соединяющему несколько участков на карбоновом полигоне Чеченской Республики [Гуния и др., 2021; Керимов и др., 2021]. Более подробно изучена ландшафтная дифференциация на высокогорном – Галанчожском участке. Для этого были применены результаты классификации ландшафтного покрова по снимку

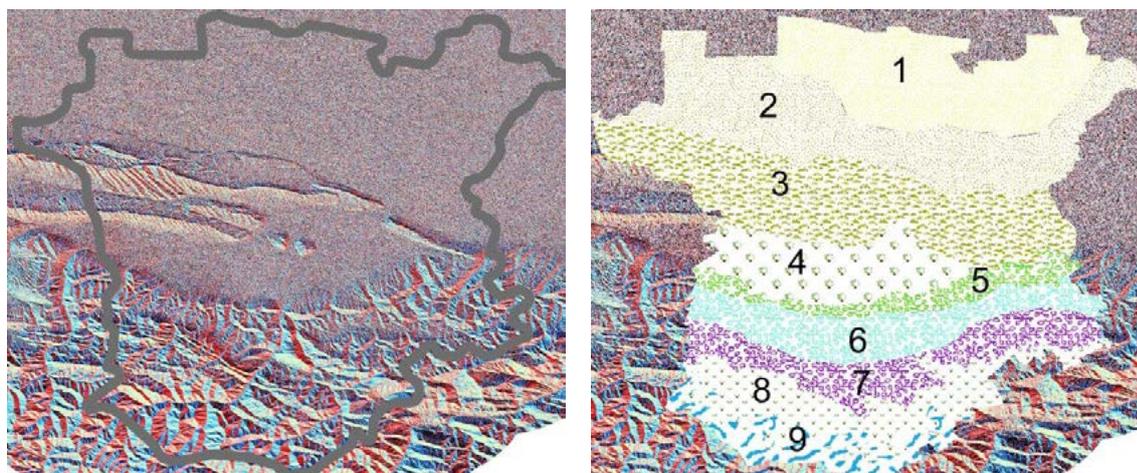


Рис. 1. Рельеф (справа) и высотно-зональные типы ландшафтов (слева) территории Чеченской Республики (см. легенду в таблице 1) /  
Fig. 1. Relief (on the right) and altitudinal-zonal types of landscapes (on the left) of the territory of the Chechen Republic (see the legend in Table 1)

Таблица 1 / Table 1

**Потенциальные запасы углерода в пределах ландшафтных высотных зон /  
Potential carbon stocks within landscape altitudinal zones**

Ландшафтные высотные зоны / Landscape altitudinal zones	Номер на карте (рис. 1) / Number on the map (Fig. 1)	Потенциальное накопление углерода в тоннах на гектар: I – менее 10, II – 10-100, III – более 100 / Potential carbon accumulation in tons per hectare: I – less than 10, II – 10-100, III – more than 100
Равнинная сухостепная с фрагментами полупустынь / Plain dry steppe with fragments of semi-deserts	1	I
Равнинная степная кустарниковая с фрагментами луго- и лесостепей / Plain steppe shrubland with fragments of meadow and forest steppes	2	II
Предгорно- и низкогорно-лесостепная с массивами степей и мелколесья / Foothill and low-mountain forest-steppe with massifs of steppes and low forests	3	II
Предгорная лесостепная окультуренная / Foothill forest-steppe cultivated	4	II
Предгорно- и низкогорно-лесная широколиственная, местами лесостепная / Foothill and low mountain forest broad-leaved, in some places forest-steppe	5	III
Низкогорно- и среднегорно-лесная преимущественно широколиственная, местами смешанных лесов / Low-mountain and mid-mountain forest predominantly broad-leaved, in some places mixed forests	6	III
Высокогорно-лесная преимущественно мелколиственная, местами хвойно-мелколиственных лесов и лесолуговых участков / Alpine-forest predominantly small-leaved, in some places coniferous-small-leaved forests and forest-meadow areas	7	II
Высокогорно-луговая / Alpine meadow	8	II
Высокогорные пустоши, местами с субнивальными лужайками / High mountain barren, in places with subnival lawns	9	I

Sentinel-2 от 15 августа 2019 г., которые были проверены в ходе экспедиционных обследований на местности. При этом использовались методы геоинформационного анализа, которые зарекомендовали себя при оценке динамики углерода (например, [Kurz et al., 2009; Malysheva et al., 2017; Schepaschenko et al., 2015]). Расчеты фитомассы проводились на основе полевых замеров с корреляцией по литературным данным, в частности, по известной работе Базилевич Н. И. [1993].

## Результаты работы и их обсуждение

Территория Чеченской Республики характеризуется контрастными границами ландшафтов как на зональном уровне, так и на локальном (рис. 1). Девять основных высотно-зональных типов ландшафтов отражают большие различия в потенциальном накоплении углерода, выраженном в количестве фитомассы в тоннах на гектар (табл. 1). Но еще большие различия наблюдаются внутри самих зон, которые могут достигать десятков раз. Это связано со сложной природной дифференциацией, когда на небольших пространствах ландшафтные комплексы с маломощным почвенным покровом и скудной растительностью (или, порой, без нее) чередуются с ландшафтами с хорошо развитым почвенно-растительным покровом.

Наибольшие вариации фитомассы наблюдаются в ландшафтных зонах: степной кустарниковой с фрагментами луго- и лесостепей, лесостепной окультуренной, предгорно- и низкогорно-лесной широколиственной, а также предгорной и низкогорно-лесной широколиственной.

Физико-географический профиль через западную часть территории Чеченской Республики протягивается до 70 км (прямая линия) и имеет перепады высот от 200 до 2100 м над уровнем моря (рис. 2). Важнейшими факторами ландшафтной дифференциации на региональном уровне являются геологическое строение, рельеф и климат. Как видно из профиля, наиболее древними породами являются юрские отложения.

В самой южной среднегорно-высокогорной части профиля преобладают нижнеюрские аргиллиты, близкие по своему составу к глинам. Поэтому они часто служат водупором, способствуя развитию оползневых процессов и соответствующих форм рельефа. Галанчожский участок приурочен к зоне разлома: относительно пологий склон западной и северо-западной экспозиции резко обрывается к руслу небольшого ручья в ущелье, которое служит границей среднеюрских алевролитов. Они являются плодородным субстратом для горно-луговостепных почв, которые служили основой для формирования террасового земледелия. Далее к северу распространены среднеюрские породы, они чередуются с верхнеюрскими, переходящими в нижнемеловые породы, представленные известковистыми породами (мел, мергель). Здесь развиты карбонатные почвы, карст, отчасти также гипсовый карст. Следующие ниже низкогорья сложены палеоген-неогеновыми майкопскими глинами, которые сменяются четвертичными отложениями из галечников, песков и глин, слагающих Чеченскую равнину. Северные части профиля представлены передовыми хребтами – Сунженским, Грозненским и Терским, сложенными преимущественно неогеновыми отложениями из песчаников и глин, переходящими в понижения между хребтов (Андреевская и Алханчуртская долины) в четвертичные отложения из галечников, песков и глин.

Большие перепады высот создали разнообразие климатических условий. Следует отметить, что обеспеченность данными о климате в горной части весьма скудная. Считается, что при подъеме на каждые 100 м температура воздуха падает в среднем на  $0,5^{\circ}$ . Зимой понижение меньше (около  $0,3^{\circ}$ ), а летом больше –  $0,6^{\circ}$ . По мере увеличения высоты местности количество осадков растет (от 300 мм на равнине за Терским хребтом до 1400-1700 мм на северных склонах Черных гор и Пастбищного хр.). В Галанчожской межгорной котловине (рис. 3) количество осадков уменьшается до 600-700 мм.

Горный рельеф сильно дифференцирует условия тепло- и влагообеспеченности. Даже на коротких расстояниях обеспеченность теплом и влагой может ва-

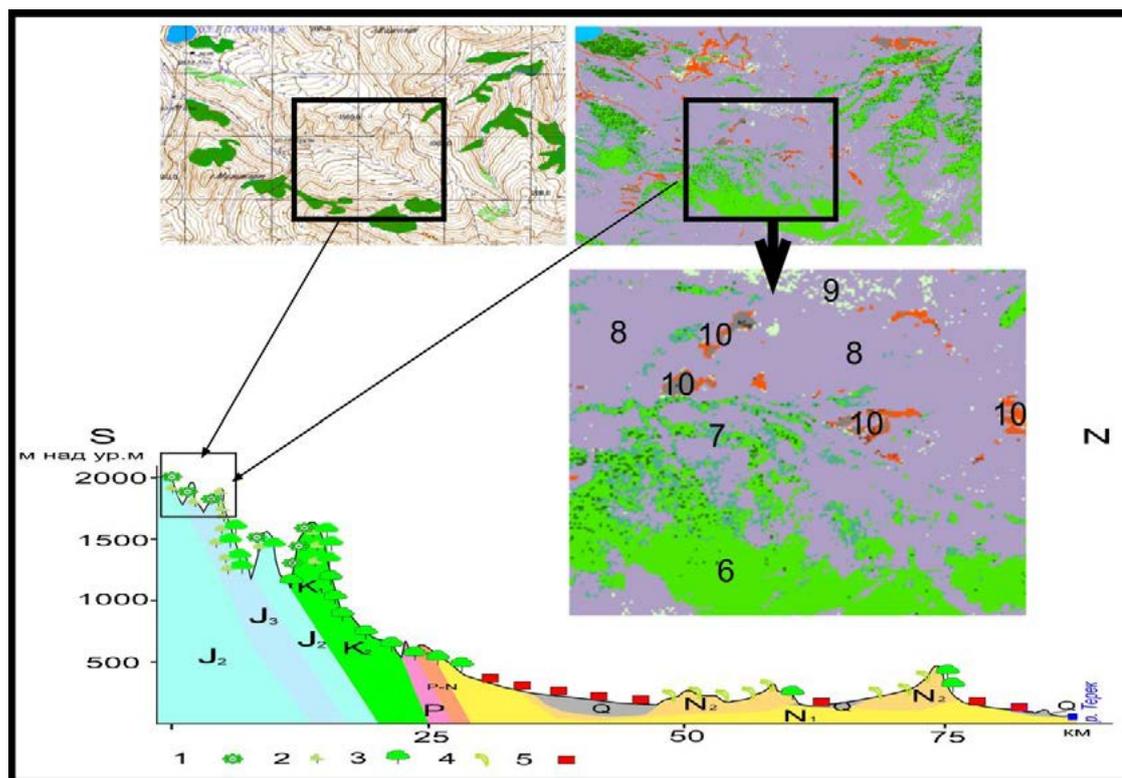


Рис. 2. Ландшафтная структура на профиле (внизу) и на Галанчоожском высокогорном участке. Цифрами на профиле показаны доминирующие ландшафты: 1 – горно-лесолуговые; 2 – горно-лесные мелколесные; 3 – горно-лесные широколиственные; 4 – горно-степные; 5 – селитебные территории и пашни. Цифрами на снимке показаны ландшафты: 6 – горно-лесные мелколиственные, 7 – горно-лесолуговые, 8 – горно-лугостепные, 9 – горно-луговые субальпийские, 10 – эрозионно-денудационные, часто с оголенными коренными породами / Fig. 2. Landscape structure on the profile (below) and in the Galanchozh high-mountain area. The numbers on the profile show the dominant landscapes: 1 – mountain-forest-meadow; 2 – mountain-forest small forest; 3 – mountain-forest broad-leaved; 4 – mountain-steppe; 5 – residential areas and arable land. The numbers on the image show landscapes: 6 – mountain-forest small-leaved, 7 – mountain-forest-meadow, 8 – mountain-meadow-steppe, 9 – mountain-meadow subalpine, 10 – erosion-denudation, often with bare bedrock.

рывать на 20-30%, что сразу заметно, например, по распространению леса. На низких высотах лес тяготеет к склонам северной экспозиции, а также к ложбинам стока (Терский и Сунженский хребты). В высокогорье – максимальная высота распространения леса приурочена к склонам южной экспозиции. Широколиственные леса из ясеня, дуба, липы, бука, граба преобладают до высоты 1000-1200 м, далее к ним примешиваются мелколиственные породы (береза). Начиная с высоты около 1500 м, леса не образуют сплошной полосы. В результате хозяйственной деятельности высотная зона от 1300-1500 до 1800 м преобразована человеком. Здесь лесная зона фрагментарна, она чередуется с лесолугостепными и лесолуговыми участками. Выше 2000 м начинается горно-луговая зона. Степные участки занимают склоны южной экспозиции передовых хребтов. На равнинах степные ландшафты трансформированы хозяйственной деятельностью и превращены в селитебные земли и сельскохозяйственные поля.

Галанчоожский участок занимает среднегорно-высокогорную зону республики в пределах абсолютных высот около 1600-1900 м. Участок представляет собой поло-

гий склон, сложенный среднеюрскими алевролитами. Доминантными природными комплексами выступают террасовидные поверхности с разнотравно-вейниковыми (из вейника тростниковидного) с пятнами рододендрона желтого (азалии) горными лугостепями на мощных горно-луговостепных черноземовидных почвах. Субдоминантными комплексами выступают лесолуговые комплексы из ивы и березы, на гребневых участках – разнотравно-дерновинно-злаковые сообщества, которые сменяются по понижениям пятнами азалии.

Как показывают результаты ландшафтного профилирования и дешифрирования снимков, условия для динамики углерода резко различаются на достаточно небольших расстояниях. Ландшафтный профиль представляет собой модель, отражающую контрастные границы и условия баланса углерода. Предгорные и равнинные участки депонируют углерод в подземной части. Определенную долю приносят извлекаемые и нередко оставляемые на поверхности продукты нефтегазового комплекса. Горные и высокогорные участки, напротив, депонируют большую часть углерода в наземной части – в основном в древесной растительности (более 50 т на га.). Сезонная и межгодовая динамика баланса углерода значительно более активная в низко- и среднегорье, где распространены горно-луговостепные, горно-лесолуговые и горно-лесные широколиственные ландшафты.

Переходя на локальный уровень ландшафтной дифференциации (Галанчожский участок), следует заметить, что контрастность условий углеродного баланса



*Рис. 3. Ландшафты высокогорного участка карбонового полигона Чеченской Республики. В центре оз. Галанчож /*  
*Fig. 3. Landscapes of the high-mountainous area of the carboniferous polygon of the Chechen Republic. In the center of the lake Galanchozh*

не уменьшается. Здесь появляются эрозионно-денудационные участки, свободные от почв и растительности. Они представляют собой, по сути, выведенные из баланса углерода территории. При этом они могут соседствовать с участками, где происходит активное накопление углерода в виде торфянистых почв под зарослями азалии, мощного дерновинно-злакового покрова в субальпийских лугах и др. Все это определяет большое разнообразие типов баланса углерода. Задача исследователя состоит при этом в выборе эффективных алгоритмов генерализации данных для больших территорий. В рамках ландшафтоведения принято считать, что ландшафт определенного ранга является целостной единицей. При таком мнении, высотная ландшафтная зона, как бы она не была внутренне мозаична, выступает определенным типом баланса углерода.

### Выводы

Одной из важнейших особенностей процесса накопления углерода является пространственно-временная дифференциация условий накопления в зависимости от ландшафтов и их использования. Различия в запасах и динамике углерода в тех ландшафтах были проанализированы на ландшафтном профиле и на фрагменте от дешифрированного космического снимка. Было обнаружено, что контрастность в условиях динамики углерода сохраняется на разных уровнях ландшафтной дифференциации: от регионального к локальному. В горно-лесных широколиственных лесах содержится больше органического углерода в надземном профиле (более 100 т / га), в то время как в горно-степных и горно-луговых ландшафтах накапливается органический углерод в почвах (десятки т / га). Нарушение естественного покрова приводит к снижению интенсивности баланса углерода. Это в целом согласуется с другими экспериментальными данными (например, [Hilton, West, 2020; Mugagga et al., 2015; Sleeter et al., 2015; Zheng et al., 2019]). Крайне высокая дифференциация условий динамики углерода в горах затрудняет оценку его баланса. В этом случае ландшафтная структура может послужить той основой, которая обеспечит репрезентативность интерполяции точечных данных.

### Литература

1. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
2. Гуня А. Н., Гакаев Р. А. Ландшафтная структура как основа для оценки динамики углерода в горах (на примере Макажойской котловины). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI. / Под ред. И. А. Керимова, В. А. Широковой, В. Б. Заалишвили, В. И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2021. – С. 332-339.
3. 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. №4. – С. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
4. Керимов И. А., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. №3 (25). – С. 35-47.
5. Кудеяров В. Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор). // Почвоведение. – 2018. – №6. – С. 643-658.

6. Курбатова А.И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 28. №4. – С. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438.
7. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.
8. 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. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052
9. 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. – Vol. 42 (1). – pp. 1-11.
10. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192 (8). – pp. 1-35.
11. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. – 2004. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57407.pdf>
12. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. // Nature Reviews Earth and Environment. – 2020. – No. 1. – pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.
13. 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). – p. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.
14. Joel L.M., Balthazar M.M., Didas N.K., John B.H., Proches M., Loth S.H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. // Journal of Soil Science and Environmental Management. – 2016. – Vol. 7 (9). – pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557
15. Karchegani P.M., Ayoubi S., Mosaddeghi M.R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. // Journal of Mountain Science. – 2012. – Vol. 9 (1). – pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2
16. Kurz W.A., Dymond C.C., White T.M., Stinson G., Shaw C.H., Rampley G.J., Smith C., Simpson B.N., Nielson E.T., Trofimow J.A., Metsaranta J., Apps M.J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // Ecological Modelling. – 2009. – Vol. 220. – pp. 480-504. DOI: 10.111016/j.ecolmodel.2008.10.018
17. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. // InterCarto. InterGIS. – 2017. – Vol. 23. – pp. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382
18. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. // International Journal of Regional Development. – 2015. – Vol. 2. No. 1. – pp. 58-75.
19. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Yu., Ontikov P.V., Schepaschenko M.V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. // Contemporary Problems of Ecology. – 2015. – Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136.
20. Sleeter B.M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. AIMS Environmental Science, 2015, 2 (3): 577-606. doi: 10.3934 / envirosci. 2015.3.577.

21. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. No. 8. – p. 708. DOI: 10.3390/f10080708

## References

1. Bazilevich N.I. Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia. Moscow. Nauka, 1993. 293 p. (In Russ.)
2. Gunya A.N., Gakaev R.A. Landscape structure as a basis for assessing carbon dynamics in the mountains (on the example of the Makazhoy depression). *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Volume XI. Ed. I. A. Kerimova, V.A. Shirokova, V.B. Zaalishvili, V.I. Cherkashina. Moscow. IIET RAN, 2021. pp. 332-339. (In Russ.)
3. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Alakhverdiev F.D. An integrated approach to assessing changes in land use and their impact on carbon dynamics in the mountain landscapes of the Chechen Republic. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2021. Vol. 15. No. 4. pp. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52 (In Russ.)
4. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). pp. 35-47. (In Russ.)
5. Kudeyarov V.N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in Russia (analytical review). *Eurasian Soil Sci*. 2018. No. 6. pp. 643-658. (In Russ.)
6. Kurbatova A. I. Analytical review on modern research on changes in the biotic components of the carbon cycle. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*. 2020. Vol. 28. No. 4. pp. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438 (In Russ.)
7. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129-147. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.61.010 (In Russ.)
8. 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. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052
9. 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. Vol. 42 (1). pp. 1-11.
10. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192 (8). pp. 1-35.
11. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. 2004. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57407.pdf>
12. Hilton R. G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020. No. 1. pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6
13. 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). pp. 8332. DOI: 10.3390/su13158332
14. Joel L.M., Balthazar M.M., Didas N.K., John B.H., Proches M., Loth S.H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2016. Vol. 7 (9). pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557

15. Karchegani P. M., Ayoubi S., Mosaddeghi M. R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. *Journal of Mountain Science* 2012. Vol. 9 (1). pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2
16. Kurz W.A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J.A., Metsaranta J., Apps M.J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220. pp. 480-504. DOI: 111016/j. ecolmodel. 2008.10.018
17. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. p. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382
18. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*. 2015. Vol. 2. No. 1. pp. 58-75.
19. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu. Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136
20. Sleeter B. M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. *AIMS Environmental Science*. 2015. Vol. 2 (3). pp. 577-606. DOI: 10.3934/environsci. 2015.3.577
21. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 8. p. 708. DOI: 10.3390/f10080708g