

DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-100-122

УДК 630:57.042(292.471)



Научная статья | Прикладная экология

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЛЕСАХ КРЫМА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕРХОВЫХ И НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ

В.Г. Кобечинская, О.Б. Ярош, В.Л. Апостолов

Приведены результаты исследований, выполненных с 2007 по 2020 гг по оценке эмиссии основных парниковых газов: углекислого, угарного, метана, закиси азота, моно- и диоксида азота, выделяющихся при верховых и низовых пожарах в лесах Республики Крым.

Целью работы являлась оценка эмиссии парниковых газов в результате пожаров по данным наземных исследований в лесах полуострова.

Материалы и методы. Объектами изучения были разновозрастные горельники сосновых лесопосадок и дубовых лесов в предгорной зоне (Симферопольское лесничество), а также сосновых и дубовых лесов Ялтинского горно-лесного природного заповедника, расположенного на Южном макросклоне Крымских гор. Рассчитаны весовые показатели для выбросов углерода при пожарах для древо-стоя, подлеска, подроста и подстилки с учетом конверсионных коэффициентов.

Результаты. Суммарные выбросы парниковых газов от пожаров разной интенсивности в предгорной зоне за этот период достигали 1575,6 т (9,87 т/га), а вклад углекислого газа в общий объем составил 6,1 т/га. В заповеднике суммарные выбросы составили 23227,8 т (20,98 т/га) и 12,8 т/га для углекислого газа. Эти показатели связаны с большим возрастом, полнотой и запасом древостоя. Вклад различных парниковых газов в общую эмиссию составил: 61,2% для углекислого газа, 28,5% для диоксида азота, 8,5% для угарного газа и менее 1,8% для метана и закиси азота в сумме.

Выводы. Используемый в работе метод расчета эмиссий парниковых газов, выделившихся при огневом воздействии на лесные экосистемы, можно рассматривать как инструментальный при детальной оценке объемов выбросов парниковых газов, образующихся при пожарах различной интенсивности.

Ключевые слова: интенсивность пожары; эмиссии; предгорные и горные леса; парниковые газы; Крым

Для цитирования. Кобечинская В.Г., Ярош О.Б., Апостолов В.Л. Оценка эмиссии парниковых газов в лесах Крыма при воздействии верховых и низовых пожаров // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Т. 15, №1. С. 100-122. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-100-122

Original article | Applied Ecology

ASSESSMENT OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN CRIMEAN FORESTS UNDER THE INFLUENCE OF CROWN AND SURFACE FIRES

V.G. Kobechinskaya, O.B. Yarosh, V.L. Apostolov

We present results of studies carried out from 2007 to 2020 on the assessment of the emission of the main greenhouse gases: carbon dioxide, carbon monoxide, methane, nitrous oxide, mono- and nitrogen dioxide, emitted during top and bottom fires in the forests of the Republic of Crimea.

The aim of the work was to monitor greenhouse gas emissions as a result of fires according to ground-based studies in the forests of the peninsula.

***Materials and methods.** The objects of study were uneven-aged burnt forests of pine plantations and oak forests in the foothill zone (Simferopol forestry), as well as pine and oak forests of the reserve located on the southern macroslope of the Crimean Mountains. The weight indicators of carbon emissions from fires for forest stand, undergrowth, undergrowth and litter are calculated taking into account conversion factors.*

***Results.** The total emissions of greenhouse gases from fires of different intensities in the foothill zone during this period reached 1575.6 t in (9.87 t/ha), and the contribution of carbon dioxide to the total volume was 6.1 t/ha. In the nature reserve, the total emissions were 23227.8 t in (20.98 t/ha) and 12.8 t/ha for carbon dioxide. These higher values are due to greater age, density and stock of the forest stand. The contributions of various greenhouse gases to the total emissions were: 61.2% for carbon dioxide, 28.5% for nitrogen dioxide, 8.5% for carbon monoxide, and less than 1.8% for methane and nitrous oxide in total.*

***Conclusions.** The method used in this study for calculating greenhouse gas emissions released during fire impact on forest ecosystems can be considered as a good toolkit for a detailed assessment of the amount of greenhouse gas emissions generated during fires of various intensities.*

Keywords: *intensity of fires; fire emissions; foothill and mountain forests; greenhouse gases; Crimea*

For citation. *Kobechinskaya V.G., Yarosh O.B., Apostopol V.L. Assessment of Greenhouse Gas Emissions in Crimean Forests under the Influence of Crown and Surface Fires. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 100-122. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-100-122*

Введение

Проблемы изменения климата являются одними из наиболее обсуждаемых в научной литературе. Однако, в настоящее время в мире нет общепризнанных единых систем учета эмиссии парниковых газов. В рамках Парижского соглашения 2015 г и Рамочной конвенции ООН об изменении климата предусмотрено, что каждое государство берет на себя обязательства по поводу разработки методик и предоставления данных по парниковым газам на национальном уровне, причем данный механизм имеет регуляторную природу.

Согласно Стратегии [14] предусматривается постепенное снижение уровня выбросов парниковых газов и Минобрнауки России разработал национальный план мероприятий на период до 2022 года путем создания сети «Полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса» (приказ № 74 от 05.02.2021 г) с целью учета выбросов парниковых газов [14, 17].

В рамках создания карбоновых полигонов для разработки технологий мониторинга и анализа способности различных территорий к ассимиляции углерода из атмосферы будут осуществляться детальные наземные полевые исследования в сочетании с дистанционным спутниковым зондированием, что позволит разработать математические алгоритмы системы учета эмиссии парниковых газов и поглощения этих выбросов для различных климатических зон страны.

В настоящее время существуют разнообразные методики, позволяющие оценить прирост массы углерода в наземных частях древостоя по параметрам интенсивности фотосинтеза [10, 19]. Также используются данные лесоустроительной информационной системы с использованием ГИС технологий и результатов наземной лесотаксации. Эти исследования основаны на моделях перехода от характеристик радиолокационного снимка к количественной оценке элементов фитомассы (стволов, ветвей, хвои или листьев) к расчету содержания в них углерода на основе вегетационных индексов (NDVI, EVI, BGNL, CWC, CN, LUR и пр.) [2, 6, 21, 22, 24, 25].

Наиболее полным является подход, включающий при учете общего количества углерода в лесах кроме древостоя, еще опад, подстилку и сухостой [18, 4]. По эмиссии парниковых газов, выделившихся при пожарах разной интенсивности, можно рассчитать аккумулированный углерод в лесных насаждениях различных государств [23].

При создании будущих карбоновых полигонов в количестве 80 единиц в России необходимо разработать адаптированные под климатические зоны методики учета парниковых газов. Одна из них, предложенная для юга России обсуждается в данной работе. Ее апробация проведена на основе исследования лесов Республики Крым.

Общая площадь лесов полуострова по состоянию на 1 января 2019 года составляет 333,9 тыс. га или 12,79% общей площади РК. В том числе, леса на землях лесного фонда, занимают 237,6 тыс. га, или 71,16% от их общей площади [9]. Согласно Лесному кодексу РФ, 2006 г, ст. 10 [8] по целевому назначению они относятся к защитным, которые выполняют средообразующие, водоохраные, санитарно-гигиенические, оздоровительные и иные полезные функции, эксплуатационных и резервных лесов в исследуемом регионе нет.

Главная проблема лесных экосистем полуострова – это пирогенный фактор разной интенсивности в результате антропогенного воздействия. Известно, что лесные компоненты обладают разной скоростью ответной реакции на внешнее огневое воздействие, что ведет к нарушению механизмов их адаптации и устойчивости. Так, при верховых пожарах происходит полная утрата существующих сообществ, а при низовых формируются экосистемы с упрощенной структурой, сокращаются площади коренных природных со-обществ, что ведет к дестабилизации их средообразующих и климаторегулирующих функций [16, 19, 20].

Целью работы являлась оценка эмиссии парниковых газов в результате пожаров по данным наземных исследований в лесах полуострова. В соответствии с ней были поставлены следующие задачи:

а) определить долю расходной части углеродного баланса по парниковым газам: метану, угарному газу, закиси азота, моно- и диоксида азота при выбросах их в результате пожаров для этих территорий;

в) оценить эмиссию основных парниковых газов, выделяющихся при пожарах разной интенсивности с учетом состава древостоя и его возраста в предгорных сосновых лесопосадках и природных дубравах, а также сосновых и дубовых лесах Южного макросклона Крымских гор в сравнительном аспекте.

Материалы и методы исследований

Растительный покров Горного Крыма разделяется на 7 поясов, три из которых приурочены к северному макросклону, три – к южному и один занимает плоскогорную вершину – яйлу [13].

Для комплексного понимания механизмов последствия воздействия пожаров разной интенсивности с учетом территориальной приуроченности объектами исследования были:

А) Предгорная зона полуострова (Симферопольское лесничество). Его географические координаты (широта, долгота): 44°58'37»N 34°9'49»E. Высоты северного макросклона нижнего предгорного пояса (до 300-400 м н.у.м.). Площадь искусственных посадок сосны крымской (*Pinus pallasiana* D.Don.) – 4408 га, дубовые леса из дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.) – 17593,5 га и дуба скального (*Quercus petraea* Liebl.) – 2204,7 га. Всего лесопокрытая площадь для данного лесничества составляет 39247 га. В исследуемой зоне наблюдается высокая интенсивность пожаров из-за близости этих лесных массивов к городской застройке.

Б) На Южном макросклоне Крымских гор (ЮМКГ) расположен Ялтинский горно-лесной природный заповедник (ЯГЛПЗ), Географические координаты (широта, долгота): 44°31'57»N 34°11'19»E. Леса приурочены к среднему лесному поясу (от 400 до 900 м н.у.м.). Общая площадь ЯГЛПЗ – 14523 га, причем лесопокрытая площадь достигает 73,4%. Род сосны (*Pinus*) представлен тремя видами: сосна Коха (*Pinus kochiana* Klotzsch ex K.Koch), сосна крымская (*Pinus pallasiana* D.Don.) и сосна Станкевича (*Pinus stankewiczii* (Sukacz.) Fomin), которые в совокупности произрастают от всей территории на 58,1% (6194,1 га). Площади, занимаемые дубом пушистым и дубом скальным существенно меньше, в сумме они занимают – 2689,6 га (25,2%) [13]. У данного заповедника отсутствует буферная зона. К его южнобережной границе прилегают курортные поселки Большой Ялты, а также по территории ЯГЛПЗ проходит ряд крупных автомобильных дорог и туристических маршрутов.

Наряду с материалами лесотаксации объектов изучения также использовались показатели, полученные на 30 пробных площадях, на которых осуществлялся мониторинг по лесовозобновлению после пожаров на протяжении 14 лет исследований (2007-2020 гг). При выборе пробной площади учитывалось, чтобы в составе древостоя доля главной породы была не меньше 9 баллов для этих фитоценозов.

Использовалась методология оценки углерода, депонированного в лесных экосистемах, которая была разработана Атрошенко и др. [1, 2]. Ряд

этих расчетных коэффициентов применен в данном исследовании для крымских лесов, как расположенных в близкой климатической зоне в части расчета расходной части углеродного баланса по углекислому газу и другим парниковым газам при выбросах их в результате пожаров.

Исследовательский алгоритм состоял из следующих этапов:

1. Расчёт содержания углерода в одиночных деревьях на основе фиксированного значения полноты насаждений на основе расчетных соотношений, приведенных в таблице 1.

Таблица 1.

Расчётные уравнения для определения содержания углерода по фракциям в сосновых и дубовых лесах, а также сосновых лесопосадок

№ формулы	Компоненты	Формулы
1	Для кроны сосны	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot \text{КАР}^{k_3} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_1 \cdot S$
2	Для ствола сосны	$(0,5 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \text{КАР}) \cdot \text{КАР}^{k_3}) \cdot r_1 \cdot S$
3	Для кроны дуба	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАА}^{k_2} \cdot \text{КАР}^{k_3} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_2 \cdot S$
4	Для ствола дуба	$(0,5 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \text{КАР}) \cdot \text{КАР}^{k_3}) \cdot r_2 \cdot S$
5	Для подростка	$k_1 \cdot k_2 \cdot \text{КАД} \cdot e^{k \cdot \text{КАН}} \cdot r_{10} \cdot S$
6	Для подлеска	$0,45 (2,561 \cdot \text{КАР} - 1,311 \cdot \text{КАР}^2 - 0,0263) \cdot k \cdot r_9 \cdot S$
7	Для подстилки	$k_1 \cdot (k_2 \cdot \text{КАА}^2 + k_3 \cdot \text{КАА} + k_4) \cdot \text{КАР}^{1,2} \cdot r_{10} \cdot S$

Примечание: КАН – высота, КАР – полнота, КАМГ – запас м^3 на 1 га, КАСС – коэффициент состава, КАА – возраст, КАД – диаметр, см, S – площадь выдела.

Источник: [1, 5]

2. Составление таблиц для расчета углерода, депонированного в дубовых и сосновых насаждениях, занимающих наибольшие площади в этих объектах на основе конверсионных коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 и r_1, r_2, r_9, r_{10} , полученных расчетным путем [12] для дубовых и сосновых лесов, а также сосновых лесопосадок (табл. 2).

Существенное влияние на развитие подростка оказывают сомкнутость древостоя, его возраст и условия произрастания. Для средневозрастных, приспевающих и спелых сосновых и дубовых насаждений коэффициенты для расчета массы углерода по формуле № 6 для подлеска из таблицы № 1 по данным [1, 2] сходны и составляют соответственно 0,6, 0,65 и 0,7, только у молодняков: для сосны – 0,5, для дуба – 0,45.

Таким образом, общая масса углерода, депонированная в изученных сосновых и дубовых сообществах Крыма, является суммой всех рассчитанных слагаемых, хотя она несколько ниже, так как мы не учитывали корни и почву.

Таблица 2.

**Коэффициенты для расчета массы углерода во фракциях древостоя,
подроста, подстилки сосны и дуба**

Порода	Фракция	№ формулы	k_1	k_2	k_3	k_4
Сосна	Крона	1	0,346	-0,793	-0,705	-
Сосна	Ствол	2	5,701	1,464	1,525	-
Сосна	Подрост	5	0,45	0,00077	0,534	-
Сосна	Подстилка	7	0,48	-0,003	0,51	0,63
Дуб	Крона	3	0,265	-0,254	-0,128	-
Дуб	Ствол	4	0,385	0,06	0,11	-
Дуб	Подрост	5	0,6	0,000497	0,515	-
Дуб	Подстилка	7	0,42	-0,0012	0,24	0,25

Источник: [1, 5]

3. При пожарах выбрасываются не только двуокись углерода, но и другие парниковые газы: метан (CH_4), монооксид углерода (CO), закись азота (N_2O), диоксид азота (NO_2) и пары воды. Метан и монооксид углерода оцениваются как доли потока углерода, высвобождаемого при горении [3]. Общее содержание азота рассчитывалось с помощью соотношения азот/углерод в сухой массе (типичное значение отношения 0,01) по Руководству МГЭИК для составления общенациональных кадастров газов с парниковым эффектом [15]. Закись азота и диоксид азота оцениваются как доли общего потока этого азота. Приводим пересчетные коэффициенты выбросов парниковых газов при горении биомассы согласно данному Руководству [15]: CH_4 – 0,012; CO- 0,06; N_2O - 0,007; NO_2 - 0,121.
4. Расчет выбросов метана и монооксида углерода (все выражено в единицах углерода) осуществлялся на основе количества высвобождаемого углерода согласно Руководству МГЭИК [15], который умножается на пропорции выбросов для метана и монооксида углерода. Для перерасчета на полный молекулярный вес выбросы метана и монооксида углерода умножаются соответственно на 16/12 и 28/12. Для оценки выбросов закиси азота и диоксида азота количество высвобождаемого углерода умножалось на 0,01 для получения общего количества освобожденного азота (N), затем это количество азота умножалось на пропорции выбросов закиси азота и диоксида азота (выражено в единицах азота). Для перерасчета на полный молекулярный вес выбросы закиси азота и диоксида азота соответственно умножались на 44/28 и 46/14. Окончательные расчеты выбросов газов при пожарах проводятся по формулам (1):

$$\begin{aligned} QCH_4 &= A \times B \times 16/12 \\ QCO &= A \times B \times 28/12 \\ QN_2O &= A \times B \times D \times 44/28 \\ QNO_2 &= A \times B \times D \times 46/14, \end{aligned} \quad (1)$$

где – выбросы парниковых газов; – освобожденный углерод; – пропорция выбросов; D – отношение N/C.

Полученные результаты обрабатывались методами вариационной статистики. Также были выполнены анализ корреляционных взаимосвязей методом парной корреляции по Пирсону и регрессионный анализ с расчетом коэффициента множественной детерминации между анализируемыми показателями в данной работе. Статистическая значимость различий в каждой выборке оценена по t-критерию Стьюдента ($p < 0,05$) [7].

Результаты исследований и их обсуждение

Сосновые леса полуострова как искусственные, так и природные насаждения, являются ведущими среди других пород, как по объему возгораний, так и по площадям, пройденных огнём. Чаще всего пожары приходится на летне-осенний период, который характеризуется длительным периодом высоких температур воздуха и очень низкой влажностью. Из-за отсутствия осадков, устойчивых ветровых потоков в горах происходит высушивание приземного слоя опада и подстилки, таким образом, происходит повышение запасов горючих материалов.

За период 1991-2020 гг. в Крыму было зарегистрировано 3160 лесных пожаров. Общая площадь гарей в регионе составляет 4199,23 га, в том числе горельников после верховых пожаров – 631,2 га.

Анализ материалов лесоквартального учета многолетней динамики (2007-2020 гг) горельников для участковых лесничеств Симферопольского лесничества выявил, что за этот период зафиксировано 337 случаев пожаров, причем самые высокие показатели их количества пришлось на 2007, 2008 и 2015 гг., в среднем по 30 случаев в год. Верховые пожары в молодых посадках сосны были по размеру сравнительно незначительны – всего 9,62 га, самая большая площадь их полного уничтожения – 2,73 га была в 2016 г, в остальные годы их быстро локализовали и площади гарей колебались от 0,05 до 2,4 га. Для лиственных лесов эта площадь несколько выше – 11,1 га, самый значимый массив верхового пожара для дуба пушистого был в 2016 г – 10,27 г, в остальные годы пожары были быстро локализованы и минимальны по размерам (0,01-0,7 га). Всего огнем разной интенсивности было пройдено 159,67 га, что

составило всего 0,41% от общей площади (39,3 тыс. га) Симферопольского лесничества.

Распределение пожаров по территориям участковых лесничеств крайне неравномерно. Наибольшее число возгораний отмечалось в Лесопарковом участковом лесничестве, непосредственно примыкающего к черте города Симферополь, имеющим наибольшие площади искусственных сосновых насаждений (3132 га), их доля составила 87% от общего числа гарей. В остальных – Перевальном, Пионерском и Партизанском участковых лесничествах их величина незначительна, так как в этом районе произрастают преимущественно пушисто-дубово-грабинниковые леса, но имеются и небольшие искусственные сосновые насаждения. В Красногорском и Межгорском участковых лесничествах пожаров за изученный период не было. Определяющими факторами возникновения пожаров являются как тип леса, так и поведение туристов, не соблюдающих правила пожарной безопасности, а также отсутствие в этом районе оборудованных стоянок. Но благодаря близости к городу, локализация огня осуществляется соответствующими службами достаточно быстро, поэтому относительная площадь гарей сравнительно мала.

В табл. 3 приводятся показатели выбросов углерода для сосны и дуба всего Симферопольского лесничества без дифференциации по участковым лесничествам при верховых пожарах.

Суммарные выбросы углерода в составе углекислого газа в Симферопольском лесничестве за период исследований от верховых пожаров составили $504,0 \pm 40,32$ т, что в пересчете на 1 га – 24,32 т со значительными колебаниями по годам без разделения по видам древостоя. В 2020 г верховых пожаров на этой территории не было, поэтому в таблице 4 приводятся только данные по 2019 г. Вклад в выбросы углерода при горении дубрав из-за малых площадей крайне незначительны по годам (7,68 т), за исключением большого пожара в 2016 г, когда эмиссии достигли $400,53 \pm 24,03$ т. Вклад сосновых молодых насаждений низок, достигая в сумме всего 95,8 т, т.е. 19,1% от общего объема эмиссий углерода.

По видовому составу при верховых пожарах видна следующая закономерность: вклад дуба – 19,62 т/га с колебанием по возрасту 45-60 лет, для сосны – 9,96 т/га с возрастным спектром 5-40 лет. Таким образом, широколиственные породы почти в два раза дают больше выбросов, чем хвойные, однако, можно предположить, что определяющий фактор – это возраст древостоя (КАА), его полнота (КАР) и запас (КАМГ) на учетной площади. Анализ корреляционных взаимосвязей методом парной корреляции по

Пирсону показал высокий уровень взаимосвязи $R=0,70$ между возрастом древостоя сосны и выбросом углерода, также обнаружена высокая корреляция между полнотой насаждений дуба $R=0,79$ и эмиссией углерода.

Таблица 3.

Расчёт выбросов по углероду из фракции древостой при верховых пожарах Симферопольского лесничества для дубовых лесов и сосновых лесопосадок по учётам с 2007 по 2019 гг в т $CO_{2-экв}$.

Год	Порода	КАА	КАР	КАМГ	КАСС	Площадь горельников, га	Суммарный выброс углерода, т $CO_{2-экв}$.
2007	Сосна	30	0,4	80	10	2,4	33,29±2,33
2008	Дуб	60	0,6	100	10	0,03	1,16±0,01
2008	Сосна	38	0,5	90	10	2,55	35,37±2,48
2009	Дуб	50	0,55	85	10	0,01	0,19±0,01
2009	Сосна	15	0,2	7	10	0,14	0,17±0,01
2011	Сосна	5	0,1	3	10	0,05	0,03±0,002
2013	Дуб	45	0,5	70	10	0,7	2,66±0,19
2013	Сосна	35	0,4	85	10	1,2	16,6±1,32
2014	Сосна	10	0,2	6	10	0,05	0,07±0,01
2015	Дуб	50	0,6	85	10	0,01	0,19±0,01
2015	Сосна	40	0,6	95	10	0,5	6,94±0,56
2016	Дуб	60	0,7	110	10	10,27	400,53±24,03
2016	Сосна	15	0,2	6,5	10	2,73	3,32±0,17
2019	Дуб	60	0,6	95	10	0,09	3,48±0,17
Всего						20,72	504,0±40,32

Примечание: КАА – возраст древостоя; КАР – полнота насаждения; КАМГ – запас m^3 на га; КАСС – коэффициент состава; S – площадь горельника.

Результаты регрессионного анализа, где в качестве независимых переменных выступали показатели КАА, КАР, КАМГ, а зависимой был определен выброс углерода, показали, что 67% вклада в выбросы углерода в сосновых насаждениях обусловлено влиянием КАА, КАР, КАМГ (коэффициент множественной детерминации $R^2=0,67$). В дубовых насаждениях данный вклад ещё выше (коэффициент множественной детерминации $R^2=0,75$), на уровне значимости $p<0,05$. Полученные результаты позволяют статистически подтвердить поставленную в данной работе исследовательскую гипотезу о тесной связи объемов выбросов углекислого газа при пожарах и возраста древостоев.

Динамика выбросов углерода в составе углекислого газа в Симферопольском лесничестве при низовых пожарах отражена в табл. 4.

Таблица 4.

Выброс углерода по фракциям в лесах Симферопольского лесничества при низовых пожарах с 2007 по 2020 гг в т $\text{CO}_{2\text{-экв}}$.

Год	Порода	Подстилка M_{C_2}	Подлесок M_{C_3}	Подрост M_{C_4}	Сумма $\sum M_i$, углерода	Площадь, га
2007	Дуб	15,25±0,91	0,63±0,01	2,10±0,13	17,98±1,26	8,33
2007	Сосна	16,03±1,12	0,15±0,01	0,49±0,02	16,67±1,0	1,98
2008	Дуб	8,84±0,44	0,31±0,01	0,92±0,05	10,07±0,5	4,43
2008	Сосна	20,91±1,46	0,52±0,02	1,98±0,12	23,41±1,64	7,35
2009	Дуб	3,77±0,15	0,09±0,002	0,48±0,02	4,34±0,17	2,15
2009	Сосна	14,75±0,88	0,13±0,004	0,87±0,05	15,75±1,10	3,20
2010	Дуб	7,78±0,31	0,47±0,02	0,19±0,01	8,44±0,51	1,85
2010	Сосна	16,66±1,17	0,81±0,02	0,79±0,05	18,26±1,2	3,12
2011	Дуб	3,04±0,1	0,09±0,001	0,42±0,02	3,55±1,17	2,15
2011	Сосна	27,42±1,92	0,24±0,01	1,48±0,01	29,14±2,04	5,95
2012	Дуб	2,71±0,14	0,02±0,001	0,33±0,01	3,06±0,18	1,25
2012	Сосна	18,53±1,29	0,40±0,02	1,37±0,07	20,30±1,22	5,22
2013	Дуб	7,96±0,32	0,29±0,01	0,84±0,05	9,09±0,45	4,05
2013	Сосна	22,50±1,80	0,45±0,02	1,71±0,12	24,66±1,97	6,34
2014	Дуб	4,30±0,21	0,22±0,01	0,51±0,02	5,03±0,25	2,45
2014	Сосна	29,54±2,66	0,59±0,04	1,40±0,07	31,53±2,21	8,32
2015	Дуб	11,29±0,79	0,40±0,02	0,96±0,05	12,65±1,01	5,21
2015	Сосна	22,01±1,76	0,44±0,02	1,54±0,1	23,99±1,44	6,20
2016	Дуб	7,86±0,47	0,17±0,01	0,20±0,01	8,23±0,32	1,87
2016	Сосна	18,86±1,51	0,38±0,02	1,50±0,1	20,74±1,04	5,31
2017	Дуб	8,62±0,43	0,09±0,01	0,45±0,02	9,16±0,55	2,05
2017	Сосна	17,74±1,42	0,35±0,02	1,04±0,06	19,13±1,34	3,85
2018	Дуб	10,72±0,75	0,19±0,01	0,57±0,03	11,48±0,69	2,55
2018	Сосна	18,67±1,68	0,31±0,02	1,07±0,07	20,05±1,20	4,05
2019	Дуб	49,17±4,43	1,73±0,10	4,22±0,30	55,12±4,96	22,69
2020	Дуб	36,91±2,95	1,29±0,05	3,17±0,25	41,37±2,89	17,03
Всего	–	421,84±33,75	10,76±0,86	30,60±2,14	463,22±37,06	138,95

Выбросы углерода в сумме от низовых пожаров без разделений на фракции за годы анализа составили 463,22±37,06 т, причем почти 64,17% эмиссий пришлось на 2007-2008, 2011, 2013, 2015, 2019-2020 гг. – наибольшее количество.

лее вододефицитные и высокотемпературные в летний период по многолетним метеонаблюдениям. Анализ роли каждой из фракций при низовом пожаре выявил, что именно подстилка продуцирует 91,1% от общего объема эмиссий углерода, вклад подроста и подлеска крайне незначительны. Выявлено, что вклад в общую эмиссию выбросов углерода фракции подстилки дуба – 2,29 т/га, существенно выше вклад сосны – 4,06 т/га.

Полученные результаты нами обобщены и представлены в виде сводной таблицы 5 по Симферопольскому лесничеству без разделения по видам древостоя, но с учетом фракционного состава этих лесных сообществ, что позволило оценить суммарные выбросы углерода в составе углекислого газа в разногодичной динамике в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$.

Таблица 5.

Выбросы углерода в составе углекислого газа при верховых и низовых пожарах в Симферопольском лесничестве по фракциям без разделения по видовому составу древостоя с 2007 по 2020 гг, т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$.

Год	Древостой M_{c1}	Подстилка M_{c2}	Подлесок M_{c3}	Подрост M_{c4}	Сумма $\sum M_i$	Общая площадь горельни- ков, га
2007	33,29±2,33	31,28±1,01	0,78±0,04	2,59±0,13	67,94±3,40	12,71
2008	36,53±1,24	29,75±0,95	0,83±0,03	2,90±0,20	70,01±4,20	14,36
2009	0,36±0,01	18,52±0,51	0,22±0,01	1,35±0,1	20,45±0,81	5,49
2010	нет	24,44±0,74	1,28±0,08	0,98±0,06	26,7±1,60	4,97
2011	0,03±0,002	30,46±0,40	0,33±0,02	1,90±0,13	32,72±1,96	8,15
2012	нет	21,24±0,72	0,42±0,03	1,71±0,1	23,37±1,40	6,47
2013	19,26±0,76	30,47±0,56	0,74±0,04	2,55±0,18	53,02±3,64	12,29
2014	0,07±0,01	33,84±1,28	0,81±0,05	1,91±0,13	36,63±2,20	10,82
2015	7,13±0,28	33,30±1,28	0,84±0,04	2,51±0,15	43,51±3,05	11,92
2016	403,85±12,1	26,72±0,99	0,55±0,02	1,69±0,12	432,8±36,95	20,18
2017	нет	26,36±0,92	0,44±0,02	1,50±0,1	28,30±1,70	5,9
2018	нет	29,39 ± 1,21	0,50 ± 0,03	1,64 ± 0,12	31,53 ± 2,21	6,6
2019	3,48±0,17	49,18±4,43	1,72±0,12	4,22±0,34	55,12±3,86	22,78
2020	нет	36,91±2,95	1,29±0,08	3,17±0,19	41,37±2,90	17,03
Итого	504,0±40,32	421,84±33,75	10,75±0,86	30,62±1,83	963,75±77,1	159,67

В атмосферу было выброшено за 14-летний период наблюдений при сгорании биомассы в сосновых лесопосадках и природных дубравах Симферопольского лесничества в сумме по всем фракциям без разделения по видовому составу древостоя – 963,75±77,1 т углерода в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$. Следует

отметить по вкладу его эмиссий с учетом породного состава насаждений в пересчете на га: молодые посадки сосны внесли в сумме – $5,2 \pm 0,3$ т/га, средневозрастные дубравы – $10,3 \pm 0,62$ т/га соответственно. Таким образом, в целом средняя эмиссия углерода в составе углекислого газа в предгорной зоне за годы исследований составила $7,75 \pm 0,62$ т/га углерода, причем именно сгоревший древостой дает 52,3%. Выбросы в результате низового пожара от горения подстилки в сумме достигают $421,8 \pm 33,75$ т углерода в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$, что в пересчете 2,6 т/га. Объемы сгоревшего подлеска и подроста сравнительно низкие – в сумме $41,4 \pm 1,34$ т углерода в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$, то есть 0,3 т/га. Поэтому именно древостой и подстилка с учетом интенсивности огневого воздействия на сообщества продуцируют при горении в целом 96,1% от общего объема эмиссий углерода.

В ЯГЛПЗ имеются большие площади естественных сосновых массивов и этот фактор обуславливает высокую частоту возникновения здесь пожаров. Так, с 1991 по 2020 г зафиксировано 1007 случаев возгораний на лесопокрытых площадях. В общей сложности пройдено пожарами 3847,0 га заповедной территории, в том числе 448,2 га – это верховые пожары с полным уничтожением лесного покрова. Доля количества крупных пожаров в целом незначительна (3,1%), но на них приходится до 95,5% от всех поврежденных огнем площадей. Самые значимые были в 1993 г – сгорело 459 га, в том числе от верхового погибло 44,3 га старовозрастных сосновых лесов и в 2007 г, когда пожар охватил 1002,35 га, в том числе площадь верхового составила – 336,3 га. Это был самый крупный пожар послевоенного периода.

Верховые пожары в ЯГЛПЗ были только в 2007, 2008, 2012 и 2020 годах. Суммарный объем выбросов углерода, накопленного в древостое ЯГЛПЗ от верховых пожаров за 14 лет по нашим опубликованным данным достигал – $9406,8 \pm 8,47$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$ с общей площади 340,1 га [5]. С учетом состава лесного массива соответственно: вклад дубрав оценивался на уровне 28,76 т/га, сосны – 11,22 т/га. В пересчете на 1 га в сумме эти выбросы углерода при верховых пожарах в заповеднике составили в среднем $19,99 \pm 1,20$ т. Сравнительный анализ вклада выбросов углерода при пожарах по фракциям четко выявляет, что именно в древостое накоплено самое высокое его количество – 66,4%, второе место занимает сгоревшая подстилка – 31,98%, достигая в сумме на Южном макросклоне Крымских гор – 98,4%, вклад остальных фракций крайне незначителен. Следовательно, с учетом возраста насаждений, вклад по выбросам углерода в результате пожаров разной интенсивности в природных фитоценозах заповедника

почти в 2,6 раза выше, чем в лесопосадках и природных лесах предгорной зоны. Объемы эмиссии углерода от сгоревшей подстилки достигают 4537,2 т в $\text{CO}_{2-ЭКВ}$, что составляет в среднем – 4,2 т/га, причем вклад от сгоревшего дуба пушистого выше, чем сосны крымской.

Исходя из данных по выбросу углерода в Симферопольском лесничестве и в ЯГЛПЗ [5], нами проведены расчеты и выявлены объемы выбрасываемых также и остальных парниковых газов: метана (CH_4), монооксида углерода (CO), закиси азота (N_2O) и диоксида азота (NO_2) согласно изложенной выше методике для обоих географических зон Крыма на исследуемых площадях по годам. Результаты данного исследования представлены на рисунках 1-4.

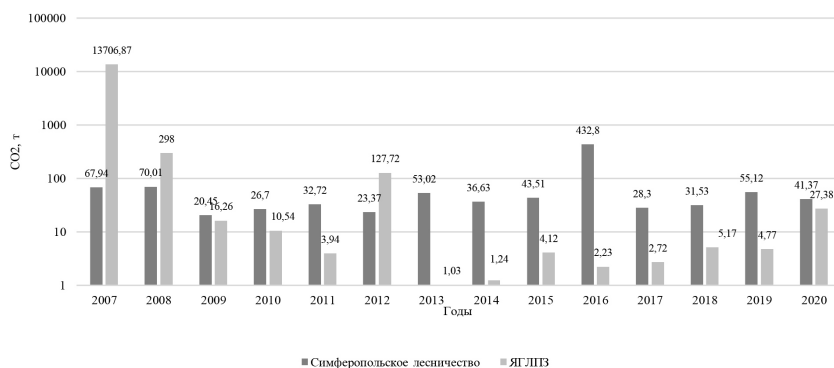


Рис. 1. Эмиссия углекислого газа с 2007 по 2020 гг в Симферопольском лесничестве и Ялтинском горно-лесном природном заповеднике после верховых и низовых пожаров без разделения по видовому составу древостоя, т в $\text{CO}_{2-ЭКВ}$

Суммарные выбросы парниковых газов от пожаров разной интенсивности в предгорной зоне за годы исследований, по нашим расчетам, составили $1575,6 \pm 24,88$ т в $\text{CO}_{2-ЭКВ}$, что в пересчете – 9,87 т/га, при этом вклад углекислого газа в общем объеме достигает 61,2 %, (6,1 т/га). С учетом возраста, полноты и запаса насаждений природных фитоценозов сосновых и дубовых лесов на Южном макросклоне Крымских гор суммарные объемы эмиссий парниковых газов более значительны – $23227,82 \pm 271,92$ т в $\text{CO}_{2-ЭКВ}$, что в пересчете – 20,98 т/га, т.е. в 2,12 раза выше, чем в предгорной зоне. Углекислый газ также является ведущим среди изученных компонентов эмиссий при горении, составляя – 61,18% (12,83 т/га). По весовым величинам выбросы диоксида азота занимают второе место после углекислого газа. В предгорной зоне они меньше суммарно – $448,42 \pm 35,87$ т в $\text{CO}_{2-ЭКВ}$

на 159,67 га, на Южном макросклоне Крымских гор достигают – 6619,01±463,33 т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$ на общей площади – 1427,23 га. Такие различия в значениях определяются разностью общих площадей гарей, т.к. в ЯГЛПЗ их почти в 9 раз больше. В пересчете на единицу площади соответственно – 2,8 т/га и 4,64 т/га.

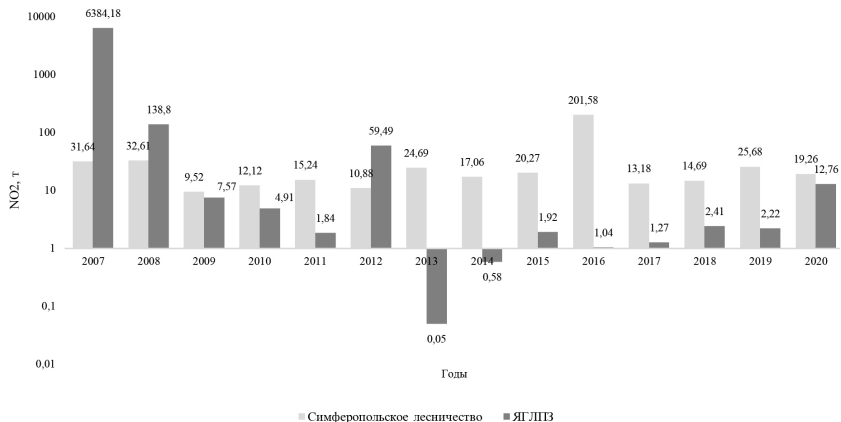


Рис. 2. Эмиссия диоксида азота с 2007 по 2020 гг в Симферопольском лесничестве и Ялтинском горно-лесном природном заповеднике после верховых и низовых пожаров без разделения по видовому составу древостоя, т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$

В процентном же соотношении по выбросам парниковых газов объемы диоксида азота на сравниваемых территориях – 28,46 - 28,49% практически совпадают.

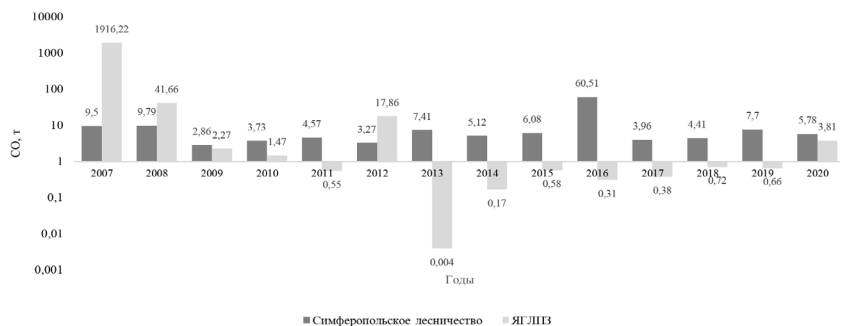


Рис. 3. Эмиссия угарного газа с 2007 по 2020 гг в Симферопольском лесничестве и Ялтинском горно-лесном природном заповеднике после верховых и низовых пожаров без разделения по видовому составу древостоя, т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$

Угарный газ по объемам выбросов при пожарах среди парниковых газов занимает третье место – в Симферопольском лесничестве - $134,69 \pm 9,43$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$, в ЯГЛПЗ – $1986,66 \pm 153,29$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$. В пересчете на единицу площади – соответственно $0,84$ т/га и $1,39$ т/га. В процентных отношениях эти показатели достигают – $8,55\%$, т.е. они одинаковые.

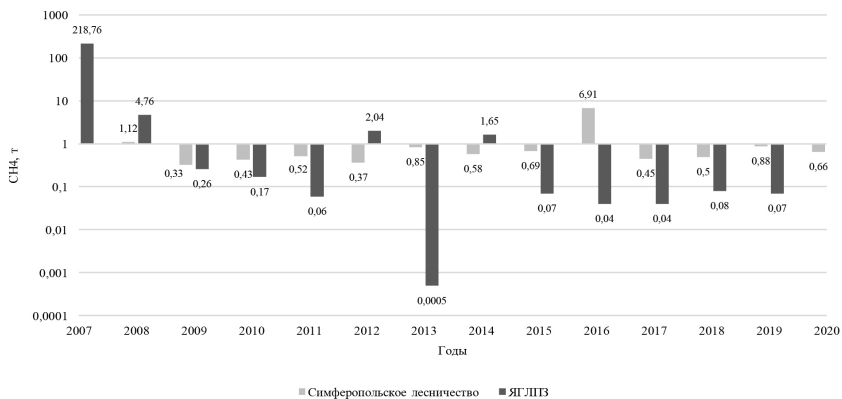


Рис. 4. Эмиссия метана с 2007 по 2020 гг в Симферопольском лесничестве и Ялтинском горно-лесном природном заповеднике после верховых и низовых пожаров без разделения по видовому составу древостоя, т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$

Вклад метана крайне незначителен. В Симферопольском лесничестве суммарно – $15,37 \pm 1,08$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$, в ЯГЛПЗ – $228,4 \pm 15,99$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$. При расчете на единицу площади соответственно – $0,1$ т/га и $0,16$ т/га, т.е. очень близки. В процентном отношении среди остальных парниковых газов его величина достигает – $0,98\%$ на обоих территориях. Эмиссия азота среди изученных парниковых газов самая низкая. В предгорной зоне она составила $13,38 \pm 0,93$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$, а на Южном макросклоне Крымских гор – $182,76 \pm 16,45$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$. В пересчете на единицу площади соответственно – $0,1$ т/га и $0,13$ т/га. В процентном отношении эта величина очень мала – всего $0,80\text{--}0,83\%$. Пропорции соотношений этих компонентов практически сходны на обоих объектах изучения. Это связано с тем, что все расчеты по количеству выбросов парниковых газов ведутся от содержания углерода.

Пожары в лесах, прилегающих к курортным поселкам южного берега Крыма оказывают крайне негативное воздействие на воздушный бассейн, разрушая природные экосистемы и резко ухудшая среду отдыха в летний период с учетом токсичности этих компонентов. Высокотемпературные

эмиссии парниковых газов способствуют снижению выпадения осадков [11]. Активизируются процессы иссушения приземного слоя почв, что нарушает водообеспеченность древостоя, усиливаются высыхание подстилки и веточного опада. При близости лесов к курортной зоне это создает условия для возникновения новых пожаров и дестабилизации природных заповедных территорий с утратой их климаторегулирующих, почвозащитных и водоохраных функций.

Выводы

Результаты исследования могут быть использованы в дальнейшем при составлении различных методик учета парниковых газов по данным наземных исследований в рамках создания карбоновых полигонов соответствующих климатических зон.

1. Выявлено, что общий объем парниковых эмиссий оценивается в предгорной зоне – $1575,6 \pm 24,88$ т $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$ т или 9,9 т/га, на Южном макросклоне Крымских гор – $23227,8 \pm 271,92$ т в $\text{CO}_{2\text{-ЭКВ}}$ т, или 20,98 т /га, то есть почти в 2,12 раза выше. Это связано с большим возрастом, полнотой и запасом древостоя. Ведущим компонентом парниковых газов при пожарах в Крыму независимо от зоны исследований является углекислый газ – в среднем 61,2%, в убывающем порядке идут выбросы диоксида азота – 28,48%, далее следует угарный газ – 8,55%, вклады метана и закиси азота незначительны (в сумме – 1,78-1,81%).

2. Показан вклад эмиссии углерода в составе углекислого газа с учетом породного состава насаждений в Симферопольском лесничестве в пересчете на 1 га. Молодые посадки сосны продуцируют $5,2 \pm 0,3$ т/га, средневозрастные дубравы – $10,3 \pm 0,62$ т/га соответственно, что в сумме в среднем за годы исследований составляет $7,75 \pm 0,62$ т/га. В ЯГЛПЗ с учетом состава лесного массива вклад дубрав в эмиссию – 28,8 т/га, сосны – 11,2т/га. В пересчете на 1 га без дифференциации по видовому составу лесов выбросы углерода составили в среднем $19,99 \pm 1,20$ т/га. Следовательно, с учетом возраста насаждений вклад по выбросам углерода в составе углекислого газа в результате пожаров разной интенсивности в природных фитоценозах заповедника почти в 2,6 раза выше, чем в искусственных и природных лесах предгорной зоны.

3. Анализ соотношений в каждой из фракций выявил, что именно сгоревший древостой и подстилка в предгорной зоне дают 96,1% от общего объема эмиссий углерода, а на Южном макросклоне Крымских гор этот показатель еще выше – 98,35%, вклад подроста и подлеска крайне незначительны. Установлено, что в общую эмиссию выбросов углерода фрак-

ции подстилки дуба продуцируют – 3,07 т/га, несколько выше сосна – 4,06 т/га для предгорья, в южнобережных фитоценозах эта тенденция сохраняется и составляет для дуба – 3,4 т/га, а для сосны – 4,8 т/га.

Список литературы

1. Атрошенко Л.М., Горобец В.Н., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Сафронова Л.П. Методики описания лесных территорий в целях обеспечения эффективного дешифрования спутниковой информации РСА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. 2008. №5(2). С. 257-264.
2. Атрошенко Л.М., Богомолов В.В., Букша И.Ф., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Костяшкин Д.С., Пастернак В.П. Технология оценки компонентов углеродного баланса лесов Украины с использованием данных зондирования Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. №2(6). С. 497-505.
3. Букша И.Ф., Пастернак В.П. Инвентаризация и мониторинг парниковых газов в лесном хозяйстве, Харьков: Новое слово, 2005. 124 с.
4. Гитарский М.Л., Карабань Р.Г., Филипчук А.Н. Расчетная оценка стока углерода в лесах России за последнее десятилетие // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2002. №18. С. 261-275.
5. Кобечинская В.Г, Ярош О.Б. Оценка эмиссии углекислого газа на заповедных территориях Крыма // Теоретическая и прикладная экология. 2019. №2. С.83-90. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-083-090>
6. Лакида П.И. Фитомасса лесов Украины. Тернополь: Збруч, 2002. 256 с.
7. Лакин Г.Ф. Биометрия. М., Высшая школа, 1990. 343 с.
8. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N.200-ФЗ. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/
9. Лесной план Республики Крым. Симферополь, 2021. 242 с. Режим доступа: <https://meco.rk.gov.ru/uploads/txteditor/meco/attachments/d4/1d/8c>
10. Моисеев Б.Н., Алябина И.О. Оценка потоков и баланс органического углерода в основных биомах России // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2004. №1. С. 61-69.
11. Нестеренко В.П. Закономерности формирования климатических изменений и их прогноз на территории Крыма // Научные ведомости: Естественные науки. 2016. №36, Т18. 239 с.
12. Петренко Н.Н., Лакида П.И. Изучение динамики фитомассы сосновых культур украинского Полесья // Научный Вестник НАУ. 2000. №25. С. 339-345.

13. Поляков А.Ф., Плуготарь Ю.В. Лесные формации Крыма и их экологическая роль. Харьков: Новое слово, 2009. 405 с.
14. О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса // Приказ Минобрнауки России № 74 от 5.02.2021. Режим доступа: <https://minobrnauki.gov.ru/upload/iblock/98d/98dacb79b446378eb420f7723a2fe191.pdf>
15. Руководство МГЭИК по составлению общенациональных кадастров газов с парниковым эффектом // Инструкция по отчетности для кадастра газов с парниковым эффектом, 1994. М. 100 с.
16. Санников С.Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов // Экология. 1981. №6. С. 23-33.
17. Стратегия долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 год // Постановление Минэкономразвития РФ. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf
18. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н. и др. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // Лесоведение. 1997. №5. С. 51-65.
19. Щепаченко Д.Г., Швиденко А.З., Шилаев В.С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственных лесов Северо-Востока России. М., ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 296 с.
20. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. №5. С. 50-61.
21. Carvalhais N. et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems // Nature. 2014. No. 514. P. 213-217. <https://doi.org/10.1038/nature13731>
22. Cruz-López M. I., Manzo-Delgado L. de L., Gómez R. A., Chuvieco E., Equihua-Benítez J. A. Spatial distribution of forest fire emissions: a case study in three Mexican Ecoregions // Remote Sensing. 2019. Vol.1185, No. 11. 18 p. <https://doi.org/10.3390/rs11101185>
23. Narayan C. Review of CO₂ emissions mitigation through prescribed burning // European Forest Institute. EFI Technical Report 25, Finland, 2007. 57p.
24. Possu W.B., Estrada J.N., Jurado H.O. An overview: the potential role of agroforestry in enhancing carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions on agricultural lands // Adv Plants Agric. Res. 2018, No. 86. P. 417-430. <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00361>
25. Thurner M., Beer C., Ciais P. et al. Evaluation of climate-related carbon turnover processes in global vegetation models for boreal and temperate forests // Glob. Chang. Biol. 2017. No.8. P. 3076-309. <https://doi.org/10.1111/gcb.13660>

References

1. Atroshenko L.M., Gorobets V.N., Gorobets N.N., Kostyashkin S.I., Safronova L.P. Metodiki opisaniya lesnykh territoriy v tselyakh obespecheniya effektivnogo deshifrovaniya sputnikovoy informatsii RSA [Methods for describing forest areas in order to ensure effective decryption of SAR satellite information]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh ob'ektov i yavleniy* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Physical principles, methods and technologies for monitoring the environment, potentially dangerous objects and phenomena], 2008, no. 5(2), pp. 257-264.
2. Atroshenko L.M., Bogomolov V.V., Buksha I.F., Gorobets N.N., Kostyashkin S.I., Kostyashkin D.S., Pasternak V.P. Tekhnologiya otsenki komponentov uglerodnogo balansa lesov Ukrainy s ispol'zovaniem dannykh zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Technology for assessing the components of the carbon balance of forests in Ukraine using Earth sensing data from space]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2009, no. 2(6), pp. 497-505.
3. Buksha I.F., Pasternak V.P. *Inventarizatsiya i monitoring parnikovyykh gazov v lesnom khozyaystve* [Inventory and monitoring of greenhouse gases in forestry], Khar'kov: Novoe slovo, 2005, 124 p.
4. Gitarskiy M.L., Karaban' R.T., Filipchuk A.N. Raschetnaya otsenka stoka ugleroda v lesakh Rossii za poslednee desyatiletie [Estimated carbon sink in the forests of Russia over the past decade]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of environmental monitoring and modeling of ecosystems], 2002, no. 18, pp. 261-275.
5. Kobechinskaya V.G., Yarosh O.B. Otsenka emissii uglekislogo gaza na zapovednykh territoriyakh Kryma [Estimation of carbon dioxide emissions in protected areas of Crimea]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2019, no. 2, pp. 83-90. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-083-090>
6. Lakida P.I. *Fitomassa lesov Ukrainy* [Phytomass of forests of Ukraine]. Ternopol': Zbruch, 2002, 256 p.
7. Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. M., Vysshaya shkola, 1990, 343 p.
8. *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [The Forest Code of the Russian Federation] N.200-FZ 04.12.2006. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/
9. *Lesnoy plan Respubliki Krym* [Forest plan of the Republic of Crimea]. Simferopol, 242 p. <https://meco.rk.gov.ru/uploads/txteditor/meco/attachments/d4/1d/8c>

10. Moiseev B.N., Alyabina I.O. *Otsenka potokov i balans organicheskogo ugleroda v osnovnykh biomakh Rossii* [Estimation of flows and the balance of organic carbon in the main biomes of Russia]. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii* [Use and protection of natural resources in Russia], 2004. no.1. pp. 61-69.
11. Nesterenko V.P. Zakonomernosti formirovaniya klimaticheskikh izmeneniy i ikh prognoz na territorii Kryma [Patterns of climate change formation and their forecast on the territory of Crimea]. *Nauchnye vedomosti: Estestvennyye nauki* [Scientific reports: Natural sciences], 2016, vol. 18, no. 36, 239 p.
12. Petrenko N.N., Lakida P.I. *Izuchenie dinamiki fitomassy sosnovykh kul'tur ukrainskogo Poles'ya* [Studying the dynamics of phytomass of pine crops of Ukrainian Polesye]. *Nauchnyy Vestnik NAU* [Scientific Herald of the NAU], 2000, no. 25, pp. 339-345.
13. Polyakov A.F., Plugotar' Yu.V. *Lesnye formatsii Kryma i ikh ekologicheskaya rol'* [Forest formations of Crimea and their ecological role]. Kharkov: A new word, 405 p.
14. O poligonakh dlya razrabotki i ispytaniy tekhnologiy kontrolya uglerodnogo balansa [On landfills for the development and testing of carbon balance control technologies]. *Prikaz Minobrnauki Rossii* [Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation] No. 74 dated February 5, 2021. <https://minobrnauki.gov.ru/upload/iblock/98d/98dacb79b446378eb420f7723a2fe191.pdf>
15. Rukovodstvo MGEIK po sostavleniyu obshchenatsional'nykh kadaстров gazov s parnikovym effektom [IPCC Guidelines for Compiling National Greenhouse Gas Inventories]. *Instruktsiya po otchetnosti dlya kadastra gazov s parnikovym effektom* [Instructions on reporting for the inventory of greenhouse gases], 1994, M., 100 p.
16. Sannikov S.N. Lesnye pozhary kak faktor preobrazovaniya struktury, vobnovleniya i evolyutsii biogeotsenozov [Forest fires as a factor of transformation of the structure, renewal and evolution of biogeocenoses]. *Ekologiya* [Ecology], 1981, no. 6, pp. 23-33.
17. Strategiya dolgosrochnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 god [Strategy of long-term development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050]. *Postanovlenie Minekonomrazvitiya RF* [Resolution of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation]. https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf
18. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N. et al. Opredelenie zapasov ugleroda nasazhdeniy na probnykh ploshchadyakh: sravnenie allometricheskogo i konversionno-ob'emnogo metodov [Determination of carbon stocks of stands on trial plots: comparison of allometric and conversion-volumetric methods]. *Lesovedenie* [Forestry studies], 1997, no. 5, pp. 51-65.

19. Shchepachenko D.G., Shvienko A.Z., Shilaev V.S. *Biologicheskaya produktivnost' i byudzhnet ugleroda listvennichnykh lesov Severo-Vostoka Rossii* [Biological productivity and carbon budget of larch forests of the North-East of Russia]. Moscow., GOU VPO MGUL, 296 p.
20. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii [Climatic changes and forest fires in Russia]. *Lesovedenie* [Forestry studies], 2013, no. 5, pp.50-61.
21. Carvalhais N. et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, 2014, no. 514, pp. 213-217. <https://doi.org/10.1038/nature13731>
22. Cruz-López M. I., Manzo-Delgado L. de L., Gómez R. A., Chuvieco E., Equihua-Benitez J. A. Spatial distribution of forest fire emissions: a case study in three Mexican Ecoregions. *Remote Sensing*, 2019, vol. 1185, no. 11, 18 p. <https://doi.org/10.3390/rs11101185>
23. Narayan C. Review of CO₂ emissions mitigation through prescribed burning. *European Forest Institute*. EFI Technical Report 25, Finland, 2007, 57p.
24. Possu W.B., Estrada J.N., Jurado H.O. An overview: the potential role of agro forestry in enhancing carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions on agricultural lands. *Adv Plants Agric. Res*, 2018, no. 86, pp. 417–430. <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00361>
25. Thurner M., Beer C., Ciais P. et al. Evaluation of climate-related carbon turnover processes in global vegetation models for boreal and temperate forests. *Glob. Chang. Biol.*, 2017, no. 8, pp. 3076-309. <https://doi.org/10.1111/gcb.13660>

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Валентина Григорьевна Кобечинская, к.б.н., доцент кафедры экологии и зоологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского» просп. Вернадского, 4. г. Симферополь, Республика Крым, 295015, Российская Федерация
valekohome@mail.ru

Ярош Ольга Борисовна, д.э.н., профессор кафедры маркетинга, торгового и таможенного дела

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского» просп. Вернадского, 4. г. Симферополь, Республика Крым, 295015, Российская Федерация
Iarosh.olga.cfu@gmail.com

Апостолов Валерий Леонидович, к.б.н., доцент кафедры экологии и зоологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского»
просп. Вернадского, 4. г. Симферополь, Республика Крым, 295015,
Российская Федерация
valeraapostolov@bk.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valentina G. Kobechinskaya, PhD, Docent of the Ecology and Zoology
Department
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Vernadsky Ave., Simferopol, Republic of Crimea, 295015, Russian
Federation
valekohome@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-9533>
SPIN-code: 816134
Scopus Author ID: 57210976735*

Olga B. Yarosh, Doctor of Economics, Professor of the Department of
Marketing, Trade and Customs
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Vernadsky Ave., Simferopol, Republic of Crimea, 295015, Russian
Federation
iarosh.olga@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9663-2528>
SPIN-code: 7140-3642*

Valery L. Apostolov, Ph.D., Docent of the Ecology and Zoology Department
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Vernadsky Ave., Simferopol, Republic of Crimea, 295015, Russian
Federation
valeraapostolov@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4591-1006>
SPIN-code: 901150
Scopus Author ID: 57211965865*

Поступила 01.08.2022

После рецензирования 24.08.2022

Принята 01.09.2022

Received 01.08.2022

Revised 24.08.2022

Accepted 01.09.2022