

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 4–16.

Forests of Russia and economy in them. 2024. № 4 (91). P. 4–16.

Научная статья

УДК 630*23

DOI: 10.51318/FRET.2024.91.4.001

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА ОСНОВНЫМИ ЛЕСООБРАЗУЮЩИМИ ДРЕВЕСНЫМИ ПОРОДАМИ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Валерий Владимирович Фомин¹, Владимир Евгеньевич Рогачев², Егор Михайлович Агапитов³, Анна Павловна Михайлович⁴, Лев Евгеньевич Рогачев⁵, Екатерина Антоновна Костоусова⁶, Елизавета Сергеевна Переходова⁷, Егор Богданович Коритняк⁸, Сергей Павлович Паршин⁹, Светлана Сергеевна Рублева¹⁰, Дмитрий Дмитриевич Стратонов¹¹, Дмитрий Юрьевич Голиков¹²

^{1–11} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

^{1–4} Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

¹² Ботанический сад УрО РАН

Автор, ответственный за переписку: Валерий Владимирович Фомин,

fominvv@m.usfeu.ru

Аннотация. В начале двадцатых годов XXI в. в ряде регионов Российской Федерации в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования создана сеть научно-исследовательских стационаров – карбоновых полигонов. На этих участках проводится изучение депонирования и эмиссии парниковых газов наземными экосистемами. На карбоновом полигоне Свердловской области, который состоит из двух участков («Коуровка» и «Северка»), проведены исследования, направленные на изучение возможности оценки депонирования углерода деревьями основных лесобразующих древесных пород с использованием аллометрических уравнений, устанавливающих взаимосвязь между диаметром ствола на высоте 1,3 м и фитомассой дерева. Получены оценки величины запаса углерода на 24 пробных площадях. Изучена возможность использования моделей регрессионного анализа и машинного обучения, а также ансамбля моделей для оценки значений диаметра ствола по высоте дерева и площади его кроны. Установлено, что модели, созданные при помощи методов машинного обучения «случайный лес», искусственная нейронная сеть, а также ансамбль моделей позволяют повысить уровень количественной адекватности моделей для оценки диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м по высоте дерева и площади его кроны.

Ключевые слова: основные лесобразующие древесные породы, депонирование углерода, модели, машинное обучение, ансамбль, Средний Урал

Финансирование: работа выполнена в рамках госбюджетной темы Министерства науки и высшего образования FEUZ-2024-0011.

Для цитирования: Депонирование углерода основными лесобразующими древесными породами карбонового полигона Свердловской области / В. В. Фомин, В. Е. Рогачев, Е. М. Агапитов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 4–16.

Original article

CARBON SEQUESTRATION BY THE MAIN FOREST-FORMING TREE SPECIES OF THE SVERDLOVSK REGION CARBON POLYGON

Valery V. Fomin¹, Vladimir E. Rogachev², Egor M. Agapitov³, Anna P. Mikhailovich⁴,
Lev E. Rogachev⁵, Ekaterina A. Kostousova⁶, Elizaveta S. Perekodova⁷, Egor B. Koritnyak⁸,
Sergey P. Parshin⁹, Svetlana S. Rubleva¹⁰, Dmitry D. Stratonov¹¹, Dmitry Yu. Golikov¹²

¹⁻¹¹ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹⁻⁴ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

¹² The Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Corresponding author: Valery V. Fomin,

fominvv@m.usfeu.ru

Abstract. A network of study areas (carbon polygons) has been established in some regions in the Russian Federation within the framework of the scientific program of the Ministry of Science and Higher Education. The deposition and emission of greenhouse gases by terrestrial ecosystems is being studied at these areas. The carbon polygon of the Sverdlovsk region consists of two sites («Kourovka» and «Severka»). Studies have been conducted to assess the possibility of estimating carbon deposition by stands of main forest-forming tree species using allometric equations that establishes the relationship between breast height diameter and the tree phytomass. Assessment of the amount of carbon stock within the 24 forest plots were implemented. The possibility of using regression analysis and machine learning models, as well as ensemble of models, to estimate value of steem diameter at breast height, using the tree height and area of the horizontal tree crown projection were analysed. It is established that the use of machine learning methods «Random Forest», artificial neural network for building methods, as well as an ensemble of models makes it possible to increase the level of quantitative adequacy of models for estimating the diameter of a tree trunk at a height of 1,3 m on the basis of described above predictors.

Keywords: main forest-forming tree species, carbon deposition, models, machine learning, ensemble, Middle Ural

Finding: this research was funded by the Russian Ministry for Science and Education (project № FEUZ-2024-0011).

For citation: Carbon sequestration by the main forest-forming tree species of the Sverdlovsk region carbon polygon / V. V. Fomin, V. E. Rogachev, E. M. Agapitov [et al.] // Forests of Russia and economy in them, 2024, № 4 (91). P. 4–16.

Введение

Стратегией низкоуглеродного развития Российской Федерации (Стратегия социально-экономического развития..., 2021) предусмотрено увеличение поглощающей способности управляемых экосистем более чем в 2 раза к 2050 г. В рамках стратегического сценария развития лесного комплекса в стратегии предусмотрено развитие испытательных полигонов, предназначенных для разработки и внедрения современных отечественных технологий и технических средств, обеспечивающих достижение целевого показателя стратегии.

В начале двадцатых годов XXI в. в ряде регионов Российской Федерации были созданы карбоновые полигоны – участки, на которых проводится изучение объемов депонирования и эмиссии парниковых газов наземными экосистемами, включая разработку технологий количественной оценки стока и эмиссии, в первую очередь углекислого газа. Один из таких участков, получивших название «Урал-Карбон», создан на территории Свердловской области (Научные исследования..., 2023).

Цель, объекты и методика исследований

Цель работы – количественная оценка величины депонирования углерода деревьями основных лесообразующих древесных пород карбонового полигона Свердловской области при помощи аллометрических уравнений оценки фитомассы дерева с использованием величины диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м, проведение анализа математико-статистических моделей, созданных в том числе при помощи методов машинного обучения, а также ансамбля моделей для оценки величины диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м по значению высоты дерева и площади его кроны.

Карбоновый полигон «Урал-Карбон» состоит из двух участков. Один из них – «Северка» (457,7 га) – находится вблизи одноименного населенного пункта на территории Уральского учебно-опытного

лесхоза Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), второй – «Коуровка» (133,8 га) – вблизи Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. На данных участках были заложены 18 и 6 круговых пробных площадей (ПП) с радиусом 13,82 м соответственно (рис. 1 и 2).

При закладке пробных площадей для определения центра пробной площади использовали GPS-приемник Garmin Etrex-10 (Garmin Inc, Switzerland, Schaffhausen), а для для определения угла, измеряемого из центра круговой ПП от направления на север до луча, направленного на каждое дерево, в пределах ПП использовали буссоль Suunto KB-14/360R (Suunto Inc., Finland, Vantaa). Измерение расстояния от центра пробной площади до дерева проводили при помощи ультразвукового дальномера Vertex 5360° (Haglöf Sweden AB,

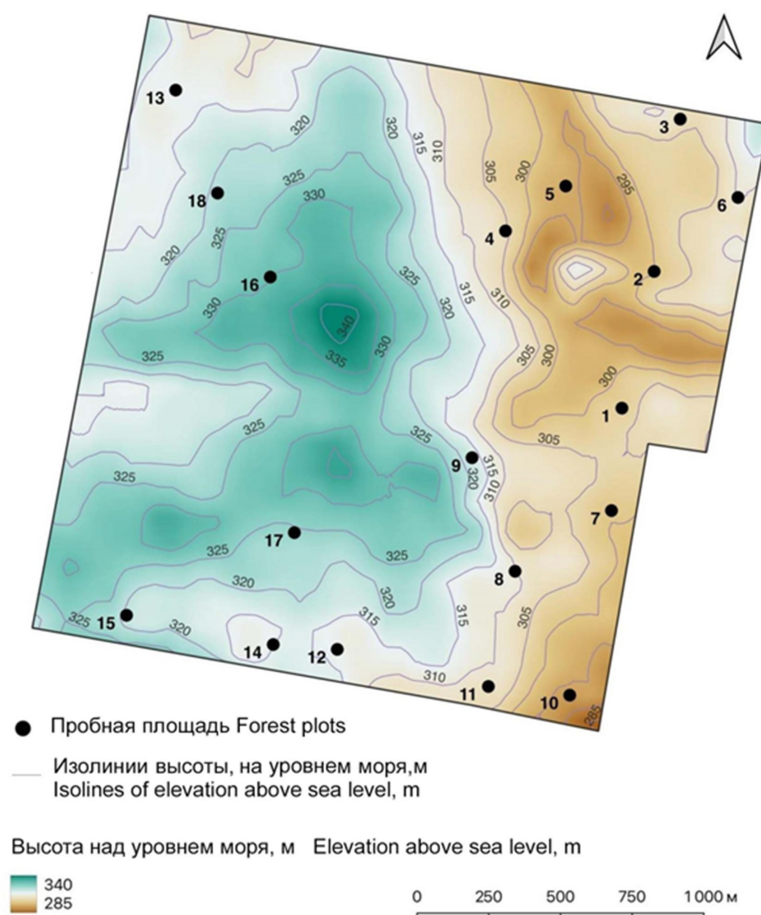


Рис. 1. Картограмма участка «Северка» карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон» с обозначением местоположения пробных площадей и рельефа

Fig. 1. Maps of the relief of the study area «Severka» of «Ural-Carbon» polygon with marking of circle forest plots location

Sweden, Långsele). Он также был использован для определения высоты дерева. Определение протяженности горизонтальной проекции кроны дерева в двух взаимно перпендикулярных направлениях выполняли при помощи мерной ленты. На основе полученных значений диаметра находили среднее значение радиуса кроны, которое использовали для расчета площади проекции кроны как площади эквивалентного круга.

На всех пробных площадях были взяты керны древесины для определения возраста деревьев и радиальных приростов при помощи возрастного бурава Haglöf (Haglöf Sweden AB, Sweden, Långsele). Для определения возраста подроста было взято несколько экземпляров древесных растений разной высоты каждой древесной породы. Дендрохронологический комплекс Lintab (Rinntech Inc., Германия) применяли для определения возраста деревьев по кернам.

Возраст дерева определяли с использованием метода коррекции высоты керна (Wong, Lertzman, 2001; Elliott, Kipfmüller, 2018). Для этого к возрасту дерева, измеренному по образцу керна, добавляли возраст экземпляра подроста соответствующей древесной породы с высотой, которая совпадает с высотой взятия керна древесины у взрослых деревьев.

Значения диаметра дерева использовали в качестве входного параметра в аллометрических уравнениях количественной оценки фитомассы надземной части деревьев основных лесообразующих древесных пород для Урала (Усольцев и др., 2022):

$$\ln P_j = a_0 + a_1 \ln DBH, \quad (1)$$

где P_j – фракция фитомассы дерева, например ствола, ветвей, коры;

\ln – натуральный логарифм;

DBH – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см.

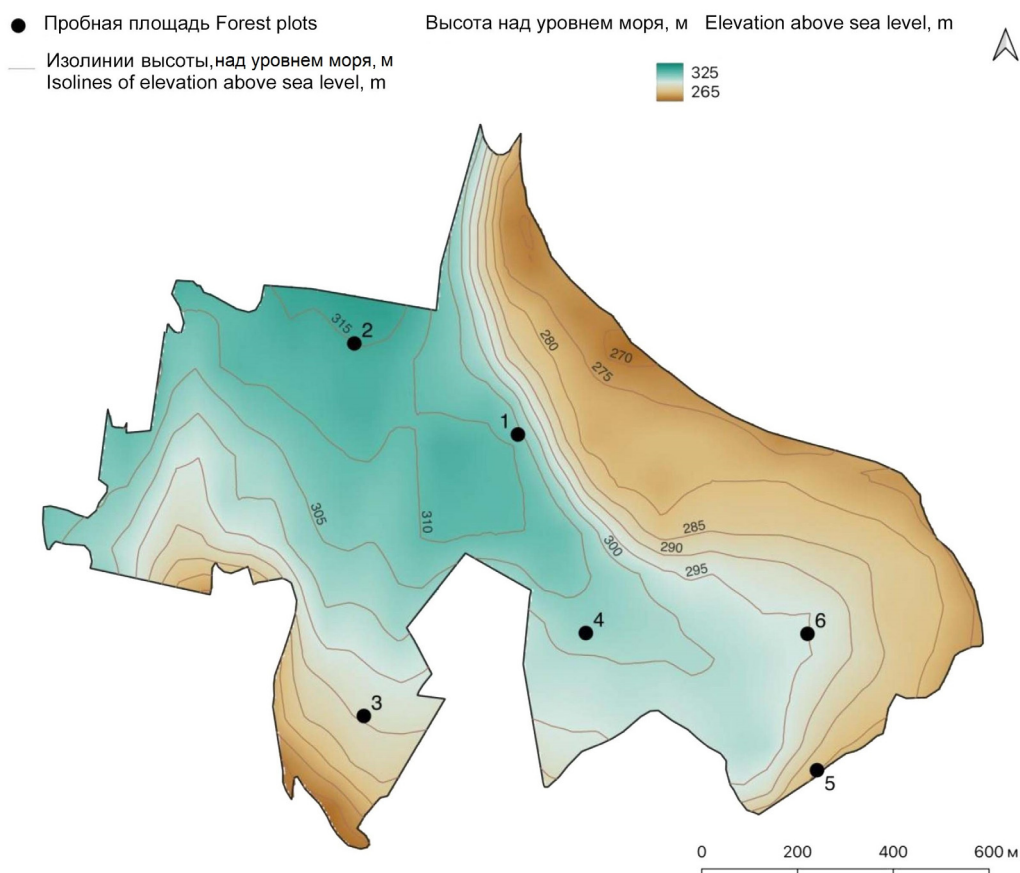


Рис. 2. Картограмма участка «Коуровка» карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон» с обозначением местоположения пробных площадей и рельефа
 Fig. 2. Maps of the relief of the study area «Kourovka» of «Ural-Carbon» polygon with marking of circle forest plots location

Величина подземной фитомассы дерева для конкретной породы оценивается умножением величины надземной фитомассы на значение коэффициента (Усольцев и др., 2022).

После потенцирования значений натурального логарифма фитомассы фракции дерева P_j получали значение сухой массы в килограммах. Содержание углерода в конкретной фракции рассчитывали по формуле

$$C_{P_j} = 0,5P_j, \quad (2)$$

где C_{P_j} – масса углерода во фракции P_j , кг;

Перевод из единиц углерода в CO_2 осуществили по формуле

$$CO_{2P_j} = 44/12C_{P_j}. \quad (3)$$

Для построения моделей расчета значений диаметра на высоте 1,3 м в зависимости от высоты и площади кроны дерева использовали язык программирования R в одноименной среде R (The R Project for Statistical Computing) с использованием следующих библиотек: MASS, Metrics, car, ggplot2, dplyr, caret, randomForest, tensorflow, keras3, neuralnet, nnet, ranger, e1071, ipred, R6, superml, devtools, caretEnsemble, mlbench, magrittr, readxl, writexl, tidyverse.

При создании моделей исходная выборка разбивалась на тестовую (70 %) и обучающую (30 %). На основе данных тестовой выборки создавали модели. На основе измеренных и теоретических значений тестовой выборки рассчитывали статистические метрики моделей. В статье приведены значения одной из них – коэффициента детерминации.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены данные о метоположении и характеристиках древостоев 24 пробных площадей, заложенных на участках карбонового полигона. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что на ПП на участке «Северка» возраст древостоев варьирует от 55 до 170 лет, а в составе преобладает сосна. На участке «Коуровка» средний возраст древостоев на ПП лежит в интервале от 60 до 120 лет, а в составе преобладает как сосна, так и ель.

С использованием уравнения (1), а также значений коэффициентов и свободных членов уравнения

для основных лесообразующих древесных пород Урала, приведенных в работе В. А. Усольцева с соавторами (Усольцев и др., 2022), рассчитаны величины надземной и подземной фитомассы деревьев на пробных площадях. В табл. 2 приведены значения углерода и углеродных единиц с использованием уравнений (2) и (3) и рассчитаны значения углерода и CO_2 -эквивалента на пробных площадях участков «Северка» и «Коуровка», а также значения в пересчете на гектар. Содержание углерода в древостое варьирует примерно от 46 до 200 т/га.

Представленные в таблицах данные о содержании углерода в древостоях пробных площадей достаточно хорошо соотносятся с данными, полученными Мерила с соавторами (Carbon Stocks..., 2023) для надземной и подземной частей деревьев для сосновых и еловых древостоев для южной части Финляндии (в широтном градиенте от 60° до 63° с. ш.). Результаты их исследований свидетельствуют о том, что для насаждений с преобладанием сосны в составе содержание углерода лежит в интервале 56,3–109,6 т/га, а для древостоев с преобладанием ели – 106,5–190,3 т/га.

На рис. 3 приведен график зависимости средней величины депонирования углерода в тоннах на гектар в год, полученной в результате деления значения депонированного углерода древостоем на его средний возраст линией тренда в виде логарифмической регрессии. Он позволяет оценить общую тенденцию сокращения величины депонирования углерода без учета условий местопроизрастания, густоты древостоя и состава лесного насаждения.

Содержание CO_2 -экв. по данным пробных площадей на двух участках карбонового полигона в пересчете на 1 га находится в пределах от 169,5 до 734 т, а среднее значение – 515,9 т.

Значение диаметра ствола на высоте 1,3 м используется в уравнениях оценки фитомассы фракций дерева в качестве единственного предиктора или в составе других, например, с высотой дерева или радиусом его кроны широко используется в разных регионах Земли (Аллометрические модели..., 2016; Усольцев и др., 2022; Wong, Lertzman, 2001; Nam et al., 2016; Allometric biomass..., 2018; Challenges in estimating..., 2019; Allometric equations to estimate..., 2020; Addi et al., 2022).

Таблица 1
Table 1

Характеристики древостоев пробных площадей
на участках карбонового полигона «Северка» и «Коуровка»
Characteristics of tree stands of forest plots
at the carbon polygons «Severka» and «Kourovka»

Номер ПП Plot Number	Номер квартала Forest block number	Номер выдела Parcell number	Состав древостоя Treestand species composition	Возраст, лет Age, year	Диаметр, см DBH, cm	Высота, м Height, m	Класс бонитета Site quality-class	Густота, шт./га Treestand density, pieces per hectare
Северка / Severka								
1	36	51	8С1Лц1Б+Е	70	20,49	18,3	2	1167
2	36	32	8С2Б ед,Е	55	18,73	17,8	4	1350
3	36	6	6С3Б1Е	65	23,84	20,4	2	867
4	36	18	3Е2С2Лц3Б	70	28,25	22,4	3	500
5	36	19	5С2Е3Б	90	19,57	18,7	2	1083
6	36	13	7С1Е1Лц1Б+Е	120	24,88	18,5	2	967
7	42	11	6Лц2С3Б	75	27,28	22,7	2	600
8	42	17	4С3Лц3Б+Е	110	28,95	21,2	3	633
9	41	5	5С3Лц1Е1Б	75	22,26	18,6	3	917
10	42	23	8С1Лц1Б+Е	75	28,37	21,9	3	533
11	42	21	4С4Лц1Е1Б	130	27,34	20,8	2	633
12	41	16	4Е2П2Б2Ос	65	25,85	21,6	3	533
13	35	3	6С2Е1П1Б	170	22,40	19,5	3	1083
14	40	27	6Е3Б1Ос+П	130	19,64	17,8	3	933
15	40	25	5Лц2Е3Б ед,С	130	17,78	17,5	3	683
16	35	24	7С2Б1Е	100	31,09	22,9	3	517
17	40	10	8С1Лц1Б+Е	120	12,45	13,6	2	700
18	35	21	6Б1С1Е	60	10,50	12,0	2	1333
Коуровка / Kourovka								
1	23	11	7С2П1Б+Е	120	29,19	25,4	2	750
2	23	10	6Е2П2Б	80	26,15	25,0	1	783
3	23	23	5С3Е2П	60	26,40	24,6	1А	883
4	23	24	4Е3П1С1Лц1Б	100	29,51	25,7	2	617
5	23	34	9С1Б+П+Е	100	25,09	19,9	3	717
6	23	25	7Е2П1С	110	18,52	21,1	3	350

Существующие технологии получения данных дистанционного зондирования при помощи беспилотных летательных аппаратов с использованием лидара, RGB- или мультиспектральных камер позволяют извлечь информацию о высоте дерева

и площади его кроны. Два этих параметра могут быть использованы для оценки диаметра дерева на высоте 1,3 м (DBH) от его высоты (H) и площади горизонтальной проекции кроны (S_{cr}).

Таблица 2
Table 2

Содержание углерода и углеродных единиц в древостоях пробных площадей и в пересчете на гектар на участках карбонового полигона «Северка» и «Коуровка»

The content of carbon and carbon units in stands of forest plots and per hectare carbon polygons «Severka» and «Kourovka»

Номер ПП Plot Number	Содержание углерода, т Carbon content, tonnes		CO ₂ -эквивалент, т CO ₂ equivalent, tonnes	
	на ПП per plot	на гектар per hectare	на ПП per plot	на гектар per hectare
Северка / Severka				
1	7,9	131,2	28,9	480,9
2	7,0	117,2	25,8	429,9
3	8,6	143,8	31,6	527,4
4	6,6	110,0	24,2	403,4
5	6,1	102,0	22,4	374,1
6	12,0	200,2	44,0	734,0
7	8,1	134,5	29,6	493,0
8	11,0	183,6	40,4	673,2
9	6,9	115,1	25,3	422,0
10	8,0	133,6	29,4	489,9
11	10,5	175,6	38,6	643,9
12	5,6	93,4	20,5	342,3
13	8,1	134,8	29,7	494,3
14	6,0	99,2	21,8	363,9
15	2,8	46,2	10,2	169,5
16	8,7	144,5	31,8	529,7
17	7,7	127,6	28,1	467,8
18	10,5	175,4	38,6	643,0
Коуровка / Kourovka				
1	11,5	192,0	42,2	704,2
2	10,1	169,1	37,2	619,9
3	10,5	174,3	38,4	639,3
4	8,8	146,5	32,2	537,1
5	8,5	141,5	31,1	518,9
6	11,1	185,5	40,8	680,0

На основе данных наземных измерений биометрических параметров деревьев на пробных площадях был получен ряд моделей, созданных с использованием методов машинного обучения, а также широко применяемая в данной области исследований модель множественной линейной регрессии.

В табл. 3 приведены объемы выборок и значения коэффициентов детерминации, которые характеризуют качественную адекватность полученных моделей для основных лесообразующих древесных пород отдельно для каждого из участков карбонового полигона и для всего полигона в целом.

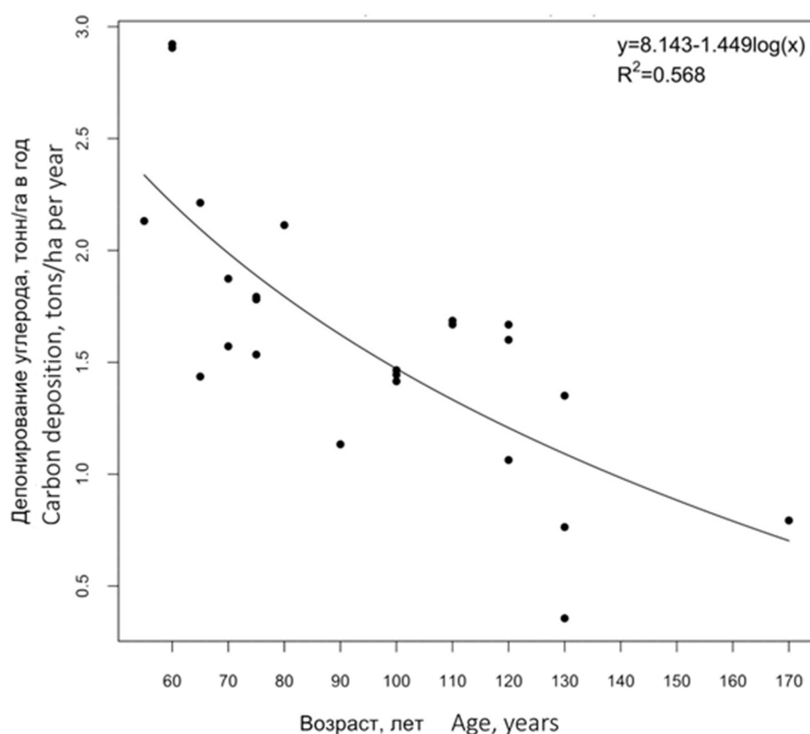


Рис. 3. График зависимости средней величины депонирования углерода в тоннах на гектар в год для древостоев разного возраста
 Fig. 3. Graph of the dependence of the average value of carbon sequestration in tons per hectare per year by tree stands of different ages

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что для моделей, созданных с использованием машинного обучения «случайный лес» (библиотека `randomForest`) и двухслойной искусственной нейронной сети (библиотека `keras3`), получены более высокие значения коэффициента детерминации по сравнению с таковыми в ансамбле моделей библиотек `caret` и `caretEnsemble`.

В табл. 4 приведены объемы объединенных по двум участкам выборок (общее количество деревьев 1122) по основным древесным породам двух участков и значения коэффициента детерминации моделей зависимости DBH от H и S_{cr} . Звездочками обозначены модели, пояснения к которым даны в примечении к табл. 3.

Несмотря на достаточно высокие значения коэффициента детерминации моделей множественной линейной регрессии, представленных в табл. 3 и 4, данные модели не прошли проверку на соблюдение некоторых условий их применимости. При проверке были выявлены одно или несколько нарушений условий: на принадлежность

остатков нормальному распределению; наличие трендов в распределении остатков по диапазонам предикторов; наличие влиятельных значений, обоснованность удаления которых из выборки не найдена. Это не означает, что модели множественной линейной регрессии для всех представленных в табл. 3 и 4 древесных пород должны быть полностью отвергнуты. Некоторые из них могут быть доработаны путем последовательного устранения нарушения условий применимости (там, где это возможно). Например, наиболее перспективной с точки зрения такой доработки является модель множественной линейной регрессии для сосны.

Данные табл. 3 и 4 свидетельствуют о достаточно высокой количественной адекватности моделей машинного обучения. Модель искусственной нейронной сети с двумя скрытыми слоями из 5 и 3 нейронов, созданная с использованием библиотеки `R keras3`, показала наилучшие результаты из всех полученных моделей или их ансамбля для пихты, ели и сосны для участка «Коуровка», а также для пихты на участке «Северка» (см. табл. 4).

Таблица 3
Table 3

Значения коэффициентов детерминации моделей оценки величины диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м от высоты дерева и площади горизонтальной проекции его кроны для участков карбонового полигона «Северка» и «Коуровка»
The determination coefficient values for models DBH~(H,Scr) for main tree species «Severka» and «Kourovka» carbon polygons

Древесная порода Tree species	Количество деревьев Trees number	Ансамбль из 4 моделей* Ensemble of 4 models	Случайный лес** Random Forest	Нейросеть*** Neural network	Множественная линейная регрессия**** Multiple linear regression
Северка / Severka					
Пихта (Fir)	26	0,80	0,64	0,89	0,81
Ель (Spruce)	272	0,91	0,92	0,88	0,91
Сосна (Pine)	210	0,74	0,75	0,77	0,80
Береза (Birch)	57	0,94	0,97	0,93	0,89
Лиственница (Larch)	311	0,66	0,67	0,67	0,70
Коуровка / Kourovka					
Пихта (Fir)	100	0,57	0,59	0,71	0,70
Ель (Spruce)	74	0,81	0,80	0,86	0,86
Сосна (Pine)	52	0,49	0,52	0,60	0,63
Береза (Birch)	20	0,97	0,98	0,95	0,96

Примечание:

Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициента детерминации для данной древесной породы.

* В ансамбле использованы модели, построенные с применением следующих методов из библиотек R caret и caretEnsemble: случайный лес (rf), дерево решений (treebag), случайный лес (parRF), однослойная нейронная сеть (nnet).

** Использована модель случайного леса библиотеки R randomForest.

*** Использована нейросеть, созданная при помощи библиотеки R keras3 с двумя скрытыми слоями из 5 и 3 нейронов соответственно.

**** Нарушены одно или несколько условий применимости модели: нарушено условие на принадлежность остатков нормальному распределению; наличие трендов в распределении остатков по диапазонам предикторов; наличие влиятельных значений, обоснованность удаления которых из выборке не найдена.

Note:

The largest values of the coefficient of determination for this tree species are highlighted in bold.

* The ensemble uses models constructed using the following methods from libraries R “caret” and “caretEnsemble”: “rf”, “treebag”, “parRF”, single-layer neural network (“nnet”).

** The random forest model of the R library “randomForest” is used.

*** A neural network created using the R “keras3” library with two hidden layers of 5 and 3 neurons was used.

**** One or more conditions for the applicability of the model are violated: the condition for the residues to belong to the normal distribution is violated; the presence of trends in the distribution of residues across predictor ranges; the presence of influential values, the validity of which removal from the sample was not found.

Значения коэффициентов детерминации моделей для этих древесных пород равны 0,71, 0,86, 0,60 и 0,89 соответственно (см. табл. 3). Наибольшие величины данного коэффициента получены для модели «случайный лес» для ели, лиственни-

цы и березы на участке «Северка»: 0,92, 0,97 и 0,67 соответственно (см. табл. 3).

Результаты моделирования на основе объединенных данных двух участков по основным древесным породам (см. табл. 4) свидетельствуют о том,

Таблица 4
Table 4

Значения коэффициентов детерминации моделей оценки величины диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м от его высоты и площади горизонтальной проекции кроны для основных лесообразующих древесных пород в целом для карбонового полигона «Урал-Карбон»
The determination coefficient values for models DBH~(H,Scr) for main tree species for «Ural-Carbon» polygon

Древесная порода Tree species	Количество деревьев Trees number	Ансамбль из 4 моделей* Ensemble of 4 models	Случайный лес** Random Forest	Нейросеть*** Neural network	Множественная регрессия**** Multiple linear regression
Пихта (Fir)	126	0,91	0,89	0,90	0,92
Ель (Spruce)	346	0,94	0,94	0,93	0,92
Сосна (Pine)	262	0,69	0,71	0,65	0,67
Береза (Birch)	331	0,65	0,65	0,70	0,69
Лиственница (Larch)	57	0,94	0,97	0,93	0,89

Примечание:

Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициента детерминации. Пояснения для моделей, обозначенных звездочками, приведены в примечании к табл. 3.

Notes:

The largest values of the coefficient of determination for this tree species are highlighted in bold. Explanations for the models marked with asterisks are given in the note to Table 3.

что ансамбль из 4 моделей, две из которых представляют собой реализацию метода «случайный лес» с использованием библиотек *R* rf и parRF, одна модель однослойной нейронной сети с использованием библиотеки pnet и модель, созданная на основе подвыборок с использованием дерева решений treemap, показал наилучшие результаты для пихты и ели. Коэффициенты детерминации для ансамбля этих моделей для пихты составляют 0,91, для ели – 0,94.

Модели, созданные с использованием метода «случайный лес» из библиотеки *R* randomForest, по величине коэффициента детерминации превосходили другие модели для ели и лиственницы. Значения R^2 для этих пород равны 0,94 и 0,97 соответственно. Для сосны коэффициент детерминации данной модели равен 0,71. Для березы наибольшее значение $R^2 = 0,70$ достигается при использовании модели искусственной нейронной сети с двумя скрытыми слоями.

Выводы

Карбоновый полигон Свердловской области «Урал-Карбон» состоит из двух участков «Северка» (пос. Северка) и «Коуровка» (пос. Куровка),

площадь которых составляет 457,7 га и 133,8 га соответственно. На основе данных наземных измерений биометрических параметров деревьев и аллометрических уравнений для основных лесообразующих древесных пород Урала получены данные о величине депонирования углерода древостоями на пробных площадях. Установлено, что содержание углерода в древостоях в пересчете на гектар лежит в интервале от 46 до 200 т.

Так как значение диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м является одним из основных предикторов и очень часто единственным предиктором в аллометрических моделях оценки фитомассы дерева, проведено моделирование зависимости диаметра ствола на высоте 1,3 м от его высоты и площади горизонтальной проекции кроны дерева. Высота дерева и площадь его кроны могут быть оценены с использованием лидара и RGB- или мультиспектральной камеры, установленных на беспилотном летательном аппарате. На основе перечисленных выше биометрических параметров у 1122 деревьев основных лесообразующих древесных пород (пихта, ель, сосна, лиственница и береза) созданы модели множественной линейной регрессии, а также модели с использованием

разных методов машинного обучения. Установлено, что модели машинного и ансамбля моделей обладают высоким уровнем количественной адекватности и могут быть использованы для количественной оценки диаметра ствола дерева на высоте 1,3 м по высоте дерева и площади его кроны.

Наиболее высокие значения коэффициента детерминации получены для ели, пихты и лиственницы – 0,91–0,97. Для березы и сосны значения коэффициента наилучших моделей равны 0,71 и 0,70 соответственно.

Список источников

- Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ / В. А. Усольцев, В. П. Часовских, Ю. В. Норицина, Д. В. Норицин // Сибирский лесной журнал. 2016. № 4. С. 68–76.
- Научные исследования и разработки Уральского государственного лесотехнического университета в области климатических проектов / В. В. Фомин, С. В. Залесов, Е. М. Аганитов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 4 (87). С. 4–17. DOI: 10.51318/FRET.2023.87.4.012
- Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года от 29.10.2021 № 3052-р. URL: <http://government.ru/docs/43708/> (дата обращения: 10.09.2024).
- Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицин Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14.
- Addi A., Soromessa T., Bareke T. Allometric Equation for Aboveground Biomass Estimation for Selected Trees in Gesha-Sayilem Moist Afromontane // Forest. J For Res. 2022. № 11:323. DOI: 10.21203/rs.3.rs-210985/v1 (accessed 14.09.2024).
- Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China / Huaijiang He, Chunyu Zhang, Xiuhai Zhao [et al.] // PLoS ONE. 2018. № 13 (1). e0186226. DOI: 10.1371/journal.pone.0186226 (accessed 14.09.2024).
- Allometric equations to estimate aboveground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests / R. Puc-Kauil, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdéz-Lazalde [et al.] // iForest. 2020. № 13. P. 165–174. DOI: 10.3832/ifer3167-013 (accessed 14.09.2024).
- Carbon Stocks and Transfers in Coniferous Boreal Forests Along a Latitudinal Gradient / P. Merilä, A. J. Lindroos, H. S. Helmisaari [et al.] // Ecosystems. 2023. № 27. P. 151–167. DOI: 10.1007/s10021-023-00879-5 (accessed 14.09.2024).
- Challenges in estimating forest biomass: use of allometric equations for three boreal tree species / Xing Dingliang, J. A. Colin Bergeron, Kevin A. Solarik [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2019. № 49 (12). P. 1613–1622. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0258 (accessed 14.09.2024).
- Elliott G. P., Kipfmüller K. F. Multi-scale Influences of Slope Aspect and Spatial Pattern on Ecotonal Dynamics at Upper Treeline in the Southern Rocky Mountains, U.S.A // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2018. № 42. P. 45–56. DOI: 10.1657/1938-4246-42.1.45
- Nam V. T., Van Kuijk M., Anten NPR. Allometric Equations for Aboveground and Belowground Biomass Estimations in an Evergreen Forest in Vietnam // PLoS ONE. 2016. № 11 (6). e0156827. DOI: 10.1371/journal.pone.0156827 (accessed 14.09.2024).
- Wong C. M., Lertzman K. P. Errors in estimating tree age : implications for studies of stand dynamics // Can. J. For. Res. 2001. № 31. P. 1262–1271. DOI: 10.1139/cjfr-31-7-1262References

References

- Addi A., Soromessa T., Bareke T. Allometric Equation for Aboveground Biomass Estimation for Selected Trees in Gesha-Sayilem Moist Afromontane // *Forest. J For Res.* 2022. № 11:323. DOI: 10.21203/rs.3.rs-210985/v1 (accessed 14.09.2024).
- Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China / *Huaijiang He, Chunyu Zhang, Xiuhai Zhao* [et al.] // *PLoS ONE.* 2018. № 13 (1). e0186226. DOI: 10.1371/journal.pone.0186226 (accessed 14.09.2024).
- Allometric equations to estimate aboveground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests / *R. Puc-Kaul, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdéz-Lazalde* [et al.] // *iForest.* 2020. № 13. P. 165–174. DOI: 10.3832/ifer3167-013 (accessed 14.09.2024).
- Allometric models of biomass of trees of forest-forming species of the Urals / *V. A. Usoltsev, I. S. Tsepordey, D. V. Noritsin* // *Forests of Russia and agriculture in them.* 2022. № 1. P. 4–14. (In Russ.)
- Carbon Stocks and Transfers in Coniferous Boreal Forests Along a Latitudinal Gradient / *P. Merilä, A. J. Lindroos, H. S. Helmisaari* [et al.] // *Ecosystems.* 2023. № 27. P. 151–167. DOI: 10.1007/s10021-023-00879-5 (accessed 14.09.2024).
- Challenges in estimating forest biomass: use of allometric equations for three boreal tree species / *Xing Dingliang, J. A. Colin Bergeron, Kevin A. Solarik* [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research.* 2019. № 49 (12). P. 1613–1622. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0258 (accessed 14.09.2024).
- Elliott G. P., Kipfmüller K. F.* Multi-scale Influences of Slope Aspect and Spatial Pattern on Ecotonal Dynamics at Upper Treeline in the Southern Rocky Mountains, U.S.A // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research.* 2018. № 42. P. 45–56. DOI: 10.1657/1938-4246-42.1.45
- Nam V. T., Van Kuijk M., Anten NPR.* Allometric Equations for Aboveground and Belowground Biomass Estimations in an Evergreen Forest in Vietnam // *PLoS ONE.* 2016. № 11 (6). e0156827. DOI: 10.1371/journal.pone.0156827 (accessed 14.09.2024).
- Scientific research and development of the Ural State Forestry Engineering University in the field of climate projects / *V. V. Fomin, S. V. Zalesov, E. M. Agapitov* [et al.] // *Forests of Russia and economy in them.* 2023. № 4 (87). P. 4–17. DOI: 10.51318/FRET.2023.87.4.012 (In Russ.)
- Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050 dated 10.29.2021 № 3052-r. URL: <http://government.ru/docs/43708/> (accessed 09.10.2024). (In Russ.)
- Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Noritsin D. V.* Allometric models of biomass of trees of forest-forming rocks of the Urals // *Forests of Russia and the economy in them.* 2022. № 1. P. 4–14. (In Russ.)
- Wong C. M., Lertzman K. P.* Errors in estimating tree age : implications for studies of stand dynamics // *Can. J. For. Res.* 2001. № 31. P. 1262–1271. DOI: 10.1139/cjfr-31-7-1262

Информация об авторах

В. В. Фомин – доктор биологических наук, доцент,
fominvv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

В. Е. Рогачев – аспирант,
rogachevve@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

Е. М. Агапитов – аспирант,
agapitovem@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

А. П. Михайлович – старший преподаватель,
a.p.mikhailovich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

Л. Е. Рогачев Лев Евгеньевич – студент,
rogachevle@m.usfeu.ru

Е. А. Костусова – студент,

koustousova-katya@mail.ru

Е. С. Переходова – студент,

perekhodova00@gmail.com

Е. Б. Коритняк – студент,

koritnyak@bk.ru

С. П. Паршин – начальник отдела администрирования и эксплуатации компьютерных сетей

psp@m.usfeu.ru

С. С. Рублева – заведующий кафедрой высшей математики,

rublevass@m.usfeu.ru

Д. Д. Стратонов – преподаватель Уральского лесотехнического колледжа,

stratonovdd@m.usfeu.ru

Д. Ю. Голиков – научный сотрудник лаборатории древесных растений Ботанического сада УрО РАН,

mit2704@gmail.com

Information about the authors

V. V. Fomin – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,

fominvv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

V. E. Rogachev – graduate student,

rogachevve@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

E. M. Agapitov – graduate student,

agapitovem@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

A. P. Mikhailovich – senior lecturer,

a.p.mikhailovich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

L. E. Rogachev – student,

rogachevle@m.usfeu.ru

E. A. Kostousova – student,

koustousova-katya@mail.ru

E. S. Peredodova – student,

perekhodova00@gmail.com

E. B. Koritnyak – student,

koritnyak@bk.ru

S. P. Parshin – Head of the Department of Administration and Operation of Computer Networks,

psp@m.usfeu.ru

S. S. Rubleva – Head of the Department of Higher Mathematics,

rublevass@m.usfeu.ru

D. D. Stratonov – teacher of the Ural Forestry College,

stratonovdd@m.usfeu.ru

D. Yu. Golikov – Researcher at the Laboratory of Woody Plants of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

mit2704@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.09.2024; принята к публикации 19.10.2024.

The article was submitted 30.09.2024; accepted for publication 19.10.2024.
