

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агроресомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Оригинальная статья

УДК 502/504:630*581.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

ХЛЮСТОВ ВИТАЛИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ¹✉, д-р с.-х. наук, профессор
vitakhlustov@mail.ru

ВАСЕНЁВ ИВАН ИВАНОВИЧ¹, д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой экологии
vasenev@rgau-msha.ru

ГАНИХИН АЛЕКСАНДР МАКСИМОВИЧ², аспирант, инженер 1 категории
ganikhin.timacad@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

² ФГБУ «Рослесинфорг Центрлеспроект»; 141280, Московская обл, г. Ивантеевка, Заводская ул., 10, Россия

Работа посвящена изучению взаимосвязей продуктивности сосновых древостоев с климатическими факторами регионов Центрального федерального округа РФ. Одним из наиболее эффективных инструментов выявления закономерностей естественного формирования растительных сообществ является множественный регрессионный анализ, благодаря которому появилась возможность получить сложные модели, сочетающие количественные взаимосвязи и закодированные качественные (именные) характеристики бинарными переменными, учитывающими региональные особенности формирования насаждений и их продуктивность. Предпринята попытка обосновать дифференциацию запаса полных и чистых по составу сосновых древостоев ЦФО под влиянием климатических показателей, характеризующих атмосферное увлажнение и температурный режим субъектов РФ при зафиксированных средних высотах древостоев с 5-метровой градацией 15, 20, 25 и 30 м. Обоснование наличия закономерных изменений запаса от климатических показателей подтверждено строгими статистическими суждениями в отношении достоверности коэффициента детерминации (R^2). Во всех случаях расчетное значение F-критерия Фишера превысило значение аналогичного критерия на 1-процентном уровне значимости при соответствующем числе степеней свободы, что указывает на вероятность возникновения ошибки всего в 1% случаев. Полученные регрессии являются достоверными и позволяют оценить потенциальную продуктивность древостоев, которая во многом определяется почвенно-климатическими условиями, на что указывали В.В. Докучаев, Г.Ф. Морозов, Г.Н. Высоцкий, В.Н. Сукачёв, А.И. Уткин и др. Включение в модель показателей сомкнутости лесного полога с учетом природного зонирования позволяет перейти от оценки потенциальной продуктивности древостоев к фактической. Сочетание в моделях нормативов потенциально возможной продуктивности древостоев и климатических показателей, характеризующих атмосферное увлажнение и температурный режим, позволяет глубже познать процесс формирования продуктивности лесов для построения экологически обоснованной системы управления древесными ресурсами Центрального федерального округа РФ.

Ключевые слова: моделирование, климатические показатели, продуктивность древостоев, достоверность взаимосвязей

Формат цитирования: Хлюстов В.К., Васенёв В.В., Ганихин А.М. Влияние климатических показателей на продуктивность сосновых древостоев // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131.

© Хлюстов В.К., Васенёв В.В., Ганихин А.М., 2022

Original article

THE IMPACT OF CLIMATIC INDICATORS ON THE PRODUCTIVITY OF PINE STANDS

KHLYUSTOV VITALIJ KONSTANTINOVICH¹✉, *doctor of agricultural sciences, professor*
vitakhlustov@mail.ru

VASENEV IVAN IVANOVICH¹, *doctor of biological sciences, professor, head of the department of ecology*
vasenev@rgau-msha.ru

GANIKHIN ALEXANDR MAXIMOVICH², *post graduate student, engineer of 1st category*
ganikhin.timacad@mail.ru

¹ Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, Russia

² FSBU «Roslesinforg» «Tsentrlesproekt»: 141280, Moscow region., Ivanteevka g., Zavodskaya st., 10, Russia

The work is devoted to the study of the interrelationships of the productivity of pine stands with climatic factors of the regions of the Central Federal District of the Russian Federation. One of the most effective tools for identifying patterns of natural formation of plant communities is multiple regression analysis, thanks to which it became possible to obtain complex models combining quantitative relationships and encoded qualitative (nominal) characteristics with binary variables that take into account regional features of the formation of plantings and their productivity. An attempt is made to substantiate the differentiation of the stock of complete and pure pine stands of the Central Federal District under the influence of climatic indicators characterizing atmospheric humidification and temperature regime of the subjects of the Russian Federation at fixed average heights of stands with a five-meter gradation of 15, 20, 25 and 30 m. The rationale for the presence of regular changes in the stock from climatic indicators is confirmed by strict statistical judgments regarding the reliability of the determination coefficient (R^2). In all cases, the calculated value of Fischer's F -test exceeded the value of a similar criterion by a 1 percent significance level with the corresponding number of degrees of freedom, which indicates the probability of an error in only one percent of cases. The regressions obtained are reliable and allow us to assess the potential productivity of stands, which is largely determined by soil and climatic conditions, as indicated by V.V. Dokuchaev, G.N. Morozov, G.N. Vysotsky, V.N. Sukachev, A.I. Utkin, etc. The inclusion of indicators of the closeness of the forest canopy in the model, taking into account natural zoning, allows us to move from assessing the potential productivity of stands to the actual one. The combination in the models of standards of potentially possible productivity of stands and climatic indicators characterizing atmospheric humidification and temperature regime makes it possible to gain a deeper understanding of the process of formation of forest productivity in order to build an environmentally sound system for managing wood resources of the Central Federal District of the Russian Federation.

Keywords: *productivity of stands, climatic indicators, taxation standards, modeling, statistical reliability of relationships*

Format of citation: *Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Ganikhin A.M. The impact of climatic indicators on the productivity of pine stands // Prirodobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131.*

Введение. Академик ВАСХНИИЛ Г.Н. Высоцкий для целостного представления о лесе как о явлении географическом, тесно взаимосвязанном с факторами окружающей среды, предложил ландшафтно-географическую схему влияния климатических и почвенно-грунтовых условий на породную и пространственную структуру лесов в разрезе природных зон Европейской части России.

Обширность лесных территорий, их зональное и провинциальное деление предопределяют различия в почвообразовательном и лесообразовательном процессах. Необходимость внедрения в 1970-1980-е гг. новых систем ведения

лесного хозяйства потребовала от научного сообщества усовершенствования региональных нормативов для таксации лесов и разработки правил, наставлений и рекомендаций по ведению лесного хозяйства. Так, для оценки потенциальной продуктивности насаждений были разработаны и повсеместно внедрены взаимосвязанные региональные таблицы стандартных запасов и таблицы хода роста сомкнутых древостоев для основных лесообразующих пород [2].

На современном этапе развития и цифровой трансформации лесной отрасли приоритетным научным направлением для сплошной инвентаризации лесов является разработка

информационно-справочных систем таксационных нормативов (ИССЛТН) комплексной оценки древесных ресурсов [3].

Распространение растительности по земной поверхности обусловлено количеством солнечной радиации, поступающей на единицу площади, что определяет почвообразовательный процесс и характер территориального распределения экологически устойчивой растительности. При этом древесные растения основного яруса насаждений накапливают информацию о влиянии климатических показателей на их продуктивность в виде годичных слоев. Изучением влияния климатических факторов на продуктивность лесов занимается дендроклиматохронология [4-8].

Следует отметить, что изучение продуктивности древостоев методами дендрохронологии не следует считать удачным, так как ширина годичных слоев является усредненной, линейной и относительной величиной, не связанной с продуктивностью древостоя, выраженной через сумму объема стволовой древесины (запас на единице площади ($\text{м}^3/\text{га}$)).

Обозначенные ООН экологические проблемы, связанные с изменением климата, а также с влиянием на него лесных экосистем, изложены в многочисленных публикациях. В них также указано влияние глобального потепления на распространение и формирование растительности [9-14].

Среди климатических факторов, оказывающих наибольшее влияние на лесные экосистемы, следует отметить увлажнение и температурный режим территорий. Эти факторы могут воздействовать не только на продуктивность, но и на вероятность возникновения пожаров и их интенсивность [15, 16]. Особый интерес представляют публикации, содержащие информацию о моделировании распространения лесных пожаров [17].

Общеизвестно влияние на продуктивность растительных сообществ процесса фотосинтеза, интенсивность которого тесно связана с климатическими показателями. Вместе с тем следует указать на то, что климат регионов во многом предопределяет пространственную структуру лесов, что наглядно просматривается по природным зонам в меридианном направлении и что проявляется прежде всего через снижение сомкнутости полога древостоев, через формирование явно выраженной парцеллярной структуры насаждений в результате ухудшения их фитосанитарного состояния. Поэтому особый научный интерес представляет строгое статистическое суждение с критерияльным доказательством наличия взаимосвязи стандартного запаса со средними многолетними показателями климата при разных значениях средней высоты древостоев.

Цель исследований заключается в выявлении закономерностей и статистически строгом доказательстве взаимосвязей продуктивности основных древостоев с климатическими показателями, характеризующими атмосферное увлажнение и температурный режим регионов в условиях Центрального федерального округа РФ.

Задачи исследования:

1. Получить единую, регионально ориентированную модель взаимосвязи запаса сомкнутых основных насаждений со средней высотой древостоев ЦФО.

2. Дать статистическую оценку взаимосвязей стандартного запаса древостоев с испаряемостью, суммой активных температур, годовым показателем увлажнения (M_d), показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову (ПКК).

Материалы и методы исследований. Методической основой определения запаса древостоев на пробных площадях является проведение сплошного перечета деревьев и использование таблиц объемов (сортиментных таблиц) по разрядам высот для расчета запаса по ступеням толщины и запаса древостоя в целом.

Для определения запаса при массовой таксации используются стандартные таблицы запасов, которые функционально связаны с таблицами хода роста нормальных древостоев. Эта связь предусматривает совпадение в указанных нормативах запасов при одинаковой средней высоте. Общепринятым с методической точки зрения является условие того, что табличные значения запасов должны соответствовать потенциально возможной продуктивности максимально сомкнутых древостоев.

Для решения первой задачи использованы стандартные таблицы по 17 регионам ЦФО, а также методические указания, которые предполагают включение в модели фиктивных бинарных переменных, кодирующих названия субъектов РФ [3].

Для решения второй задачи использованы методические основы парного регрессионного анализа зависимости стандартного запаса от испаряемости, суммы активных температур, годового показателя увлажнения (M_d), показателя континентальности климата по Н.Н. Иванову (ПКК). При этом влияние климатических факторов на продуктивность древостоев доказывалось статистическими критериями параметров уравнений регрессии на 1-процентном уровне значимости при соответствующем числе степеней свободы, что позволяет сделать строгое статистическое суждение и подтвердить вероятность возникновения ошибки всего лишь в 1% случаев [1].

Результаты и их обсуждение. Общеизвестно, что существенная географическая отдаленность насаждений от экологических оптимумов их произрастания отражается на интенсивности транспирации и фотосинтеза, которые напрямую связаны с экологической устойчивостью насаждений и их фитосанитарным состоянием.

Динамика продуктивности насаждений и сукцессионных процессов под влиянием климатических факторов носит в основном описательный характер. Однако в настоящее время этого недостаточно, так как требуется решение вопросов, связанных с моделированием продуктивности древостоев по регионам страны.

При наличии моделей запаса по регионам и конверсионных коэффициентов представляется возможным определить массу накопленного углерода в древостоях по фракциям фитомассы (стволов, коры, ветвей, корней, хвои и листвы). Решение поставленной задачи сводится к следующему.

Центральный федеральный округ представлен 17 субъектами РФ. Для них органами управления лесным хозяйством утверждены 17 стандартных таблиц запасов, которые включены в лесоустроительную инструкцию и макеты для проведения массовой таксации лесов при лесоустройстве. Поэтому указанные

нормативы положены в основу получения сводной модели стандартных запасов округа. Для этого субъекты РФ были закодированы бинарными переменными в соответствии с методическими указаниями [18] (табл. 1).

В результате анализа получена регрессионная модель стандартных запасов вида:

$$I = \exp((1,34852 + 1,83468 \ln H - 0,12268 \ln^2 H + \ln H(-0,22177X_1 - 0,21855X_2 + 0,0X_3 - 0,16308X_4 - 0,22177X_5 - 0,10344X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 - 0,04488X_9 - 0,22177X_{10} - 0,10151X_{11} - 0,22177X_{12} + 0,0X_{13} - 0,13604X_{14} - 0,21855X_{15} - 0,18919X_{16})) + \ln^2 H(0,08595X_1 + 0,08552X_2 + 0,0X_3 + 0,06285X_4 + 0,08595X_5 + 0,03851X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 + 0,01892X_9 + 0,08595X_{10} + 0,04005X_{11} + 0,08595X_{12} + 0,0X_{13} + 0,05020X_{14} + 0,08552X_{15} + 0,07326X_{16}))$$

$$t = | 9,2; 17,1; 6,1; 5,7; 5,6; 4,05,7; 2,7; 1,2; 5,7; 2,6; 5,7; 3,5; 5,6; 4,9; 6,8; 3,0; 1,5; 6,8; 3,1; 6,8; 3,9; 6,7; 5,8 | > t_{0,5} = 1,96;$$

$$R^2 = 0,999; E = \pm 2,1\%;$$

$$F = 1399,9 \text{ при } P < 0,05.$$

Таблица 1

Кодирование бинарными переменными стандартных значений запаса по субъектам ЦФО

Table 1

Encoding of standard stock values by regions of the Central Federal District with binary variables

Область <i>Region</i>	Блочные фиктивные переменные / <i>Block dummy variables</i>															
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
Белгородская / <i>Belgorod</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Брянская / <i>Bryansk</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Владимирская / <i>Vladimir</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Воронежская / <i>Voronezh</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ивановская / <i>Ivanovo</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Калужская / <i>Kaluga</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Костромская / <i>Kostroma</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Курская / <i>Kursk</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Липецкая / <i>Lipetsk</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Московская / <i>Moscow</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Орловская / <i>Orel</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Рязанская / <i>Ryazan</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Смоленская / <i>Smolensk</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Тамбовская / <i>Tambov</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Тверская / <i>Tver</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Тульская / <i>Tula</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ярославская / <i>Yaroslavl</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Модель характеризуется высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2 = 0,999$), значимостью численных коэффициентов уравнения ($t > t_{0,5}$) и достоверностью модели по F-критерию

Фишера при $P < 0,05$, незначительной стандартной ошибкой уравнения ($E = \pm 2,1\%$).

Для таких областей, как Курская, Липецкая, Воронежская и Тамбовская, стандартные

таблицы запасов являются идентичными, что подтверждается расчетными значениями коэффициентов уравнения с нулевыми значениями. Визуализация модели представлена на рисунке 1. Анализ рисунка позволяет сделать вывод о значительных расхождениях в запасах по субъектам РФ, попадающим в две природно-климатической зоны округа. Это подтверждено

обозначением красными линиями и стрелками между максимальным и минимальным значениями запасов при фиксированной высоте, равной 30 м. Разница составляет 200 м³/га.

Разработанную модель следует рассматривать прежде всего как организационно-внедренческую при решении вопросов, связанных с цифровизацией лесоустроительных работ в ЦФО.

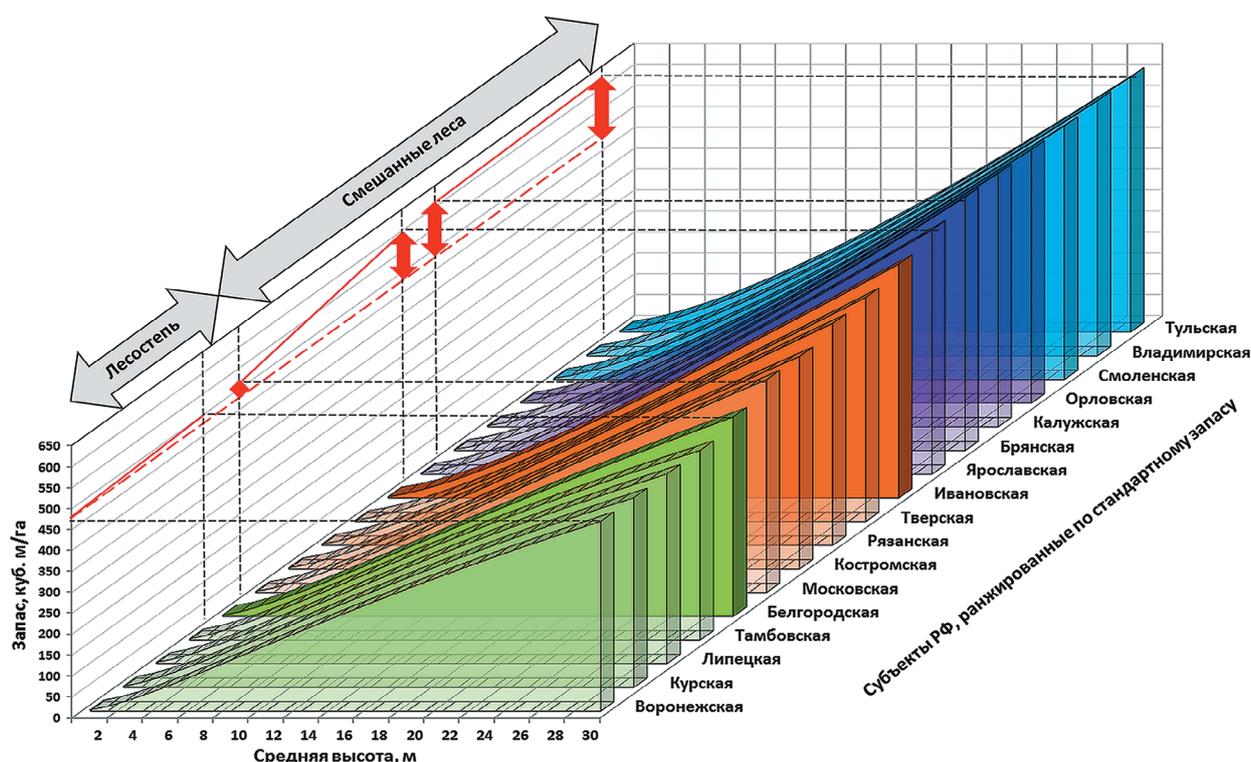


Рис. 1. Графическая интерпретация модели стандартных запасов основных древостоев по субъектам РФ ЦФО

Fig. 1. Graphical interpretation of the model of standard reserves of pine stands by regions of the Central Federal District of the Russian Federation

При решении поставленных задач о влиянии климата на лесные сообщества необходимо учитывать следующее. Запас древостоев является величиной физической, определяемой показателями их морфометрии. Общеизвестной формулой расчета запаса древостоев, чистых по составу, является формула (1):

$$M = GHF, \quad (1)$$

где G – сумма площадей сечений древостоя, м²; H – средняя высота древостоя, м; F – видовое число.

Показатель, характеризующий сумму площадей сечений (G) древостоя, может иметь одинаковое значение при разных значениях числа деревьев (N) и среднего диаметра древостоя (D) на оцениваемом участке, что указывает на функциональную связь между этими показателями вида:

$$G = \exp(-9,45241 + 2,0 \ln D + 1,0 \ln N); \quad (2)$$

$$R^2 = 1,0.$$

Изложенное подтверждает необходимость проведения инвентаризации лесов с применени-

ем научно обоснованных и регионально утвержденных нормативов, среди которых стандартные таблицы являются основными для достоверного определения запаса древостоев. Однако с научной точки зрения следует обосновать достоверность различий в стандартных запасах не с позиций названия субъектов РФ, а в зависимости от физических факторов, оказывающих влияние на продуктивность древостоев. По этой причине была сформулирована задача проведения статистического анализа влияния на запас таких климатических показателей, как испаряемость, сумма активных температур, годовой показатель увлажнения, коэффициент континентальности климата по Н.Н. Иванову. Краткая характеристика указанных показателей приведена ниже.

Испаряемость характеризуется суммой испарившейся влаги с постоянно увлажненной поверхности в заданную единицу времени. Единицей измерения испаряемости является миллиметр испарившейся воды. Величина

испаряемости напрямую зависит от температуры воздуха, которая является динамичной в течение суток, так и календарного года. Наибольшими значениями испаряемости характеризуются южные регионы, в то время как наименьшие значения характерны для полярных регионов.

Сумма активных температур характеризуется количеством тепла и выражается через сумму среднесуточных температур воздуха, когда температура превышает порог, необходимый для начала вегетации растений (для большей части растений порог соответствует 10°C).

Годовой показатель увлажнения (Md) отображает степень увлажнения за вегетационный период и рассчитывается по формуле:

$$Md = 1g(20I/D),$$

где I и D – годовые суммы осадков и дефицита влажности воздуха.

При оценке степени увлажнения по данному показателю пользуются следующей шкалой: 0,60 – избыточное; 0,60-0,45 – хорошее; 0,60-0,50 – более влажное; 0,50-0,45 – менее влажное; 0,45-0,25 – умеренно влажное; 0,45-0,35 – полувлажное; 0,35-0,25 – полусухое.

Коэффициент континентальности климата по Н.Н. Иванову рассчитывается по авторской формуле:

$$K = A \cdot 100 / 0,33 M,$$

где A – годовая амплитуда температуры из среднемесячных ее величин; M – широта местности.

При оценке степени континентальности по данному показателю пользуются следующей шкалой: для океанических областей значением является $K < 100\%$; для слабоумеренных и среднеконтинентальных – $100\% > K < 250\%$; для резкоконтинентальных – $K > 250\%$.

Данные о средних многолетних показателях климата, рассмотренные выше, приводятся в справочниках по агроклимату и в специальной литературе [19, 20]. Широкое применение климатические показатели нашли при зонировании территорий в целях развития сельскохозяйственного производства.

Следует отметить, что указанные переменные (выделенные полужирным шрифтом) тесно связаны между собой и с другими климатическими показателями (табл. 2).

Таблица 2
Корреляционная матрица климатических показателей 17 субъектов РФ ЦФО

Table 2
Correlation matrix of climatic indicators of 17 regions of the Central Federal District of the Russian Federation

Климатические показатели <i>Climatic indicators</i>	САМТВ	ВСП	ГПУ	ИСП	ГСО	ПКК	СТ > 10°C	АМТВ	БП	ОП t > 10°C	ТП ct > 0°C
САМТВ	1										
ВСП	0,183	1									
ГПУ	0,059	0,592	1								
ИСП	-0,064	-0,769	-0,915	1							
ГСО	0,053	0,157	0,807	-0,510	1						
ПКК	-0,077	-0,377	-0,911	0,709	-0,941	1					
СТ > 10°C	-0,003	-0,650	-0,884	0,824	-0,707	0,815	1				
АМТВ	0,068	0,857	0,654	-0,788	0,304	-0,500	-0,693	1			
БП	-0,166	-0,885	-0,683	0,791	-0,351	0,511	0,755	-0,922	1		
ОП t > 10°C	-0,153	-0,839	-0,826	0,871	-0,541	0,706	0,867	-0,875	0,926	1	
ТП ct > 0°C	-0,102	-0,838	-0,689	0,804	-0,328	0,525	0,769	-0,849	0,877	0,902	1

Обозначения / Designations:

САМТВ – средний из абсолютных минимумов температуры воздуха / *average of absolute minimal air temperatures*;

ВСП – высота снежного покрова (средняя из максимальных) (см) / *height of snow cover (average of maximal) (cm)*;

ГПУ – **годовой показатель увлажнения (Md)** / *annual indicator of moistening (Md)*

ИСП – **испаряемость за год (f)** / *evaporation per year (f)*;

ГСО – годовая сумма осадков (мм) (p) / *annual amount of precipitation (mm) (p)*;

ПКК – **показатель континентальности климата, по Н.Н. Иванову** / *indicator of continentality of climate, according to N.N. Ivanov*;

СТ > 10°C – **сумма температур за период с температурой выше 10 градусов** / *amount of temperatures for the period with the temperature higher 10 degrees*;

АМТВ – абсолютный минимум температуры воздуха / *absolute minimum of air temperature*;

БП – безморозный период / *frost-free period*

ОП t > 10°C – основной период (дни) с температурой выше 10 градусов / *main period (days) with the temperature higher 10 degrees*;

ТП ct > 0°C – теплый период (дни) с температурой выше 0 градусов / *warm period (days) with the temperature higher 0 degrees*.

Для решения второй задачи проведен регрессионный анализ зависимости запаса от перечисленных климатических показателей для средних высот древостоев 15, 20, 25, 30 м. Размах варьирования запасов при указанных значениях существенно различался. Так, при средней высоте 15 м размах составил $10 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 20 м – $50 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 25 м – $80 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 30 м – $120 \text{ м}^3/\text{га}$.

Полученные регрессии оценены строгим суждением и характеризуются достоверными коэффициентами детерминации. Во всех случаях расчетные значения F-критерия Фишера превышали теоретические на 1-процентном уровне значимости при числе степеней свободы, равном $16 (f = 17 - 1 = 16)$.

Взаимосвязь запаса с испаряемостью продемонстрирована на рисунке 2. Анализ

изменения запасов по высотам позволяет сделать вывод о том, что взаимосвязь является обратной и указывает на снижение продуктивности древостоев при увеличении испаряемости. Вариация испаряемости по субъектам ЦФО составляет от 360 до 627 мм/год. Полученные регрессии описывают от 35,3 до 58,2% дисперсии результивного признака (запаса древостоев на 1 га) при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные значения F-критерия Фишера для уравнений составили от 9,5 до 20,9. Это превысило табличное ($F_{01} = 8,7$) на 1-процентном уровне значимости, что позволяет сделать вывод о наличии достоверной взаимосвязи запаса древостоев с испаряемостью в диапазоне двух природно-климатических зон округа: лесостепной и смешанных лесов.

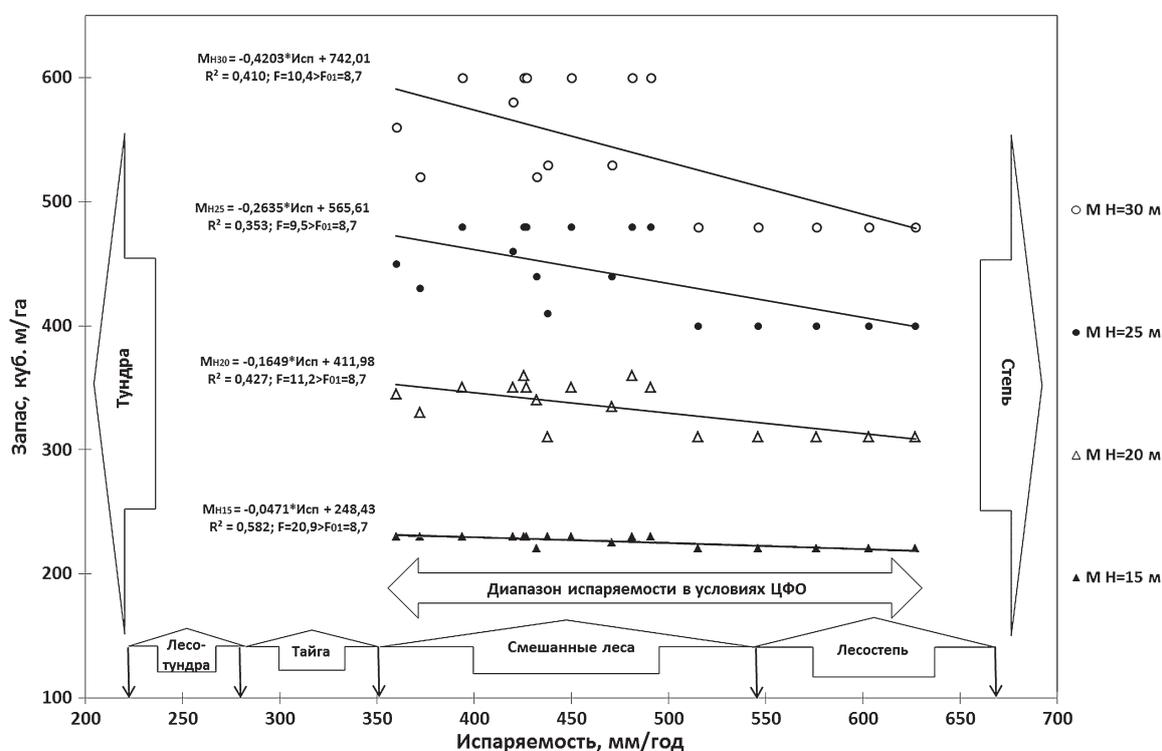


Рис. 2. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с испаряемостью при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 2. Relationships of the standard stock of tree stands with evaporation at fixed values of the average height of the stands

Взаимосвязь запаса с величиной годового показателя увлажнения приведена на рисунке 3. Размах годового показателя увлажнения по субъектам округа составляет от 0,32 до 0,60. Полученные регрессии описывают от 41,9 до 54,2% дисперсии запаса, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные значения F-критерия Фишера ($F_{\text{расч}} =$ от 10,8 до 17,9) оказались больше теоретического значения на 1-процентном

уровне значимости ($F_{01} = 8,7$). Сравнение критериев позволяет сделать вывод о наличии взаимосвязи запаса с годовым показателем увлажнения в диапазоне, охватывающем с юга часть полусухой, полувлажной, влажной зон и доходящем на севере до зоны избыточного увлажнения.

Взаимосвязь запаса с суммой активных температур приведена на рисунке 4. Линии регрессии запасов по высотам позволяют сделать

вывод о том, что при увеличении суммы активных температур происходит снижение продуктивности древостоев. Размах варьирования суммы активных температур находится в диапазоне от 1787 до 2616 C^0 . Полученные

регрессии описывают от 34,6 до 48,9% дисперсии запаса древостоев при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2).

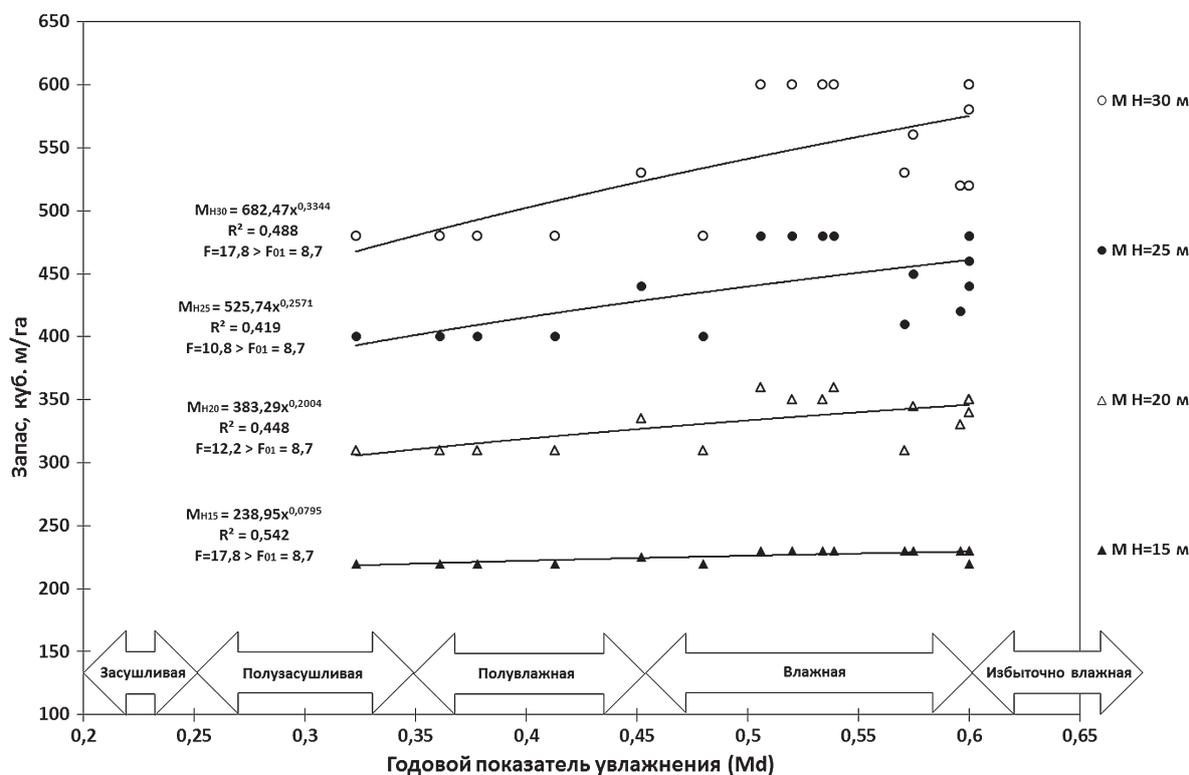


Рис. 3. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с годовым показателем увлажнения при фиксированных значениях средней высоты древостоев по зонам увлажнения

Fig. 3. Relationships of the standard stock of stands with the annual moisture index at fixed values of the average height of the stands by moisture zones

Расчетные значения F-критерия Фишера составили от 9,6 до 14,4 и превышают теоретическое значение на 1-процентном уровне значимости ($F_{01} = 8,7$). Для регрессии запаса при средней высоте 25 м значение расчетного F-критерия составляет 7,9 и находится между теоретическими значениями критериев на втором и третьем пороговых уровнях доверительной вероятности ($F_{05/01} = 4,5/8,7$). Это указывает на отсутствие строгого суждения, но подтверждает вероятность возникновения ошибки в 5% случаев. Полученные регрессии позволяют сделать вывод о достоверности взаимосвязи стандартного запаса древостоев с суммой активных температур.

Взаимосвязь запаса с показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову приведена на рисунке 5. Анализ линий регрессии запасов в разрезе заданных высот позволяет сделать вывод о том, что продуктивность уменьшается по мере увеличения значений показателя континентальности. Размах варьирования климатической характеристики по ЦФО находится в диапазоне от 145 до 180. Полученные

регрессии охватывают от 32,5 до 39,8% дисперсии запаса при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные F-критерии Фишера только для двух из четырех уравнений составили от 9,0 до 9,2, что превысило теоретические ($F_{01} = 8,7$) на 1-процентном уровне значимости. Для запасов со средней высотой древостоев 15 и 20 м значения расчетного F-критерия составляют 7,2 и 8,9 и находятся между теоретическими значениями критериев ($F_{05/01} = 4,5/8,7$), что указывает на отсутствие строгого суждения об анализируемом фрагменте. Достоверность регрессии в случае $H = 15$ м подтверждена на 5%-ном уровне значимости.

Параметры регрессионных уравнений запаса древостоев с оценкой их достоверности дают возможность ранжировать климатические показатели по степени влияния на потенциальную продуктивность древостоев. Наличие тесной взаимосвязи между рассмотренными климатическими показателями (табл. 2) позволило расставить приоритетность следующим

образом: испаряемость; годовой показатель увлажнения, M_d ; сумма активных температур;

показатель континентальности климата по Н.Н. Иванову.

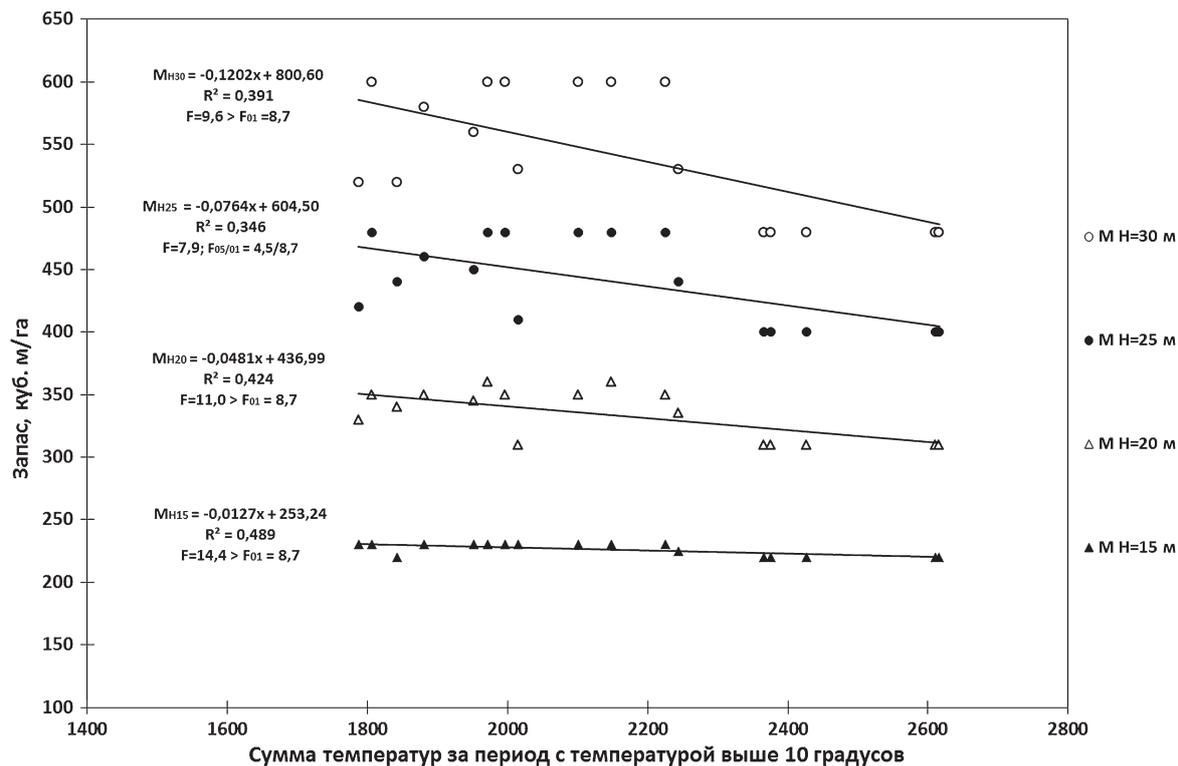


Рис. 4. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с суммой активных температур выше 10°C при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 4. Relationships of the standard stock of stands with the sum of active temperatures above 10°C with fixed values of the average height of the stands

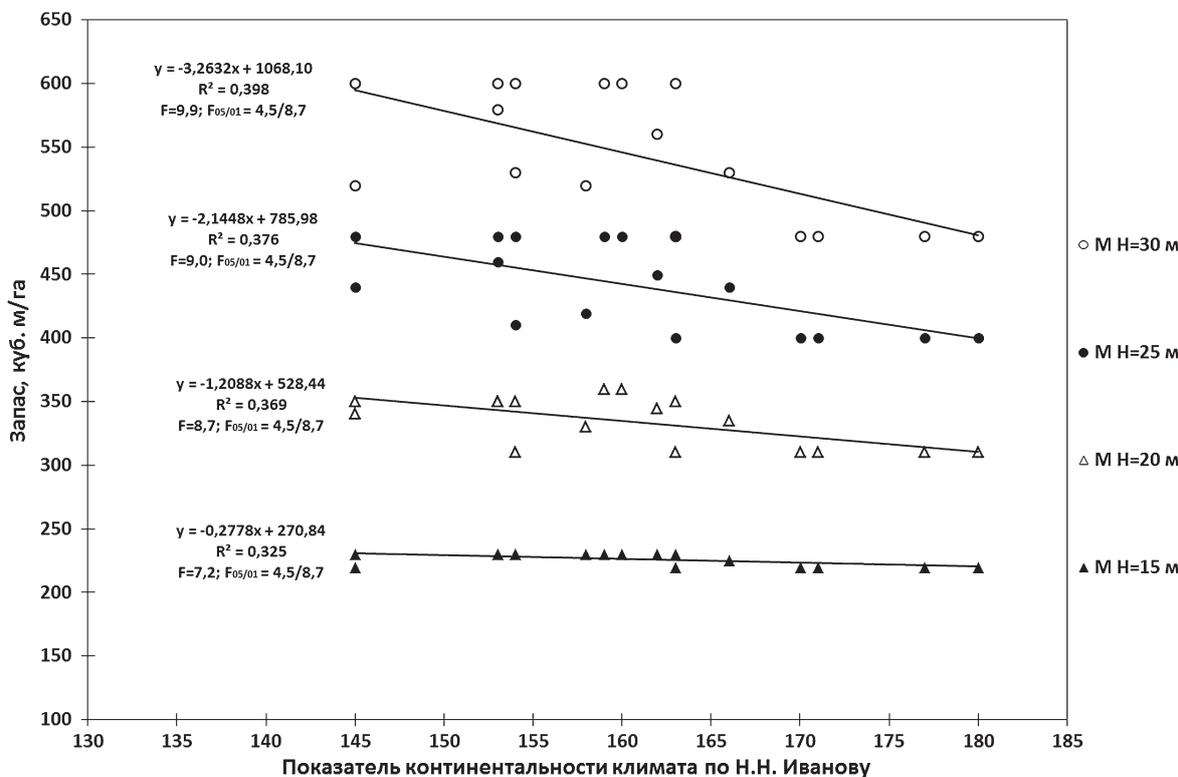


Рис. 5. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 5. Interrelations of the standard stock of tree stands with the indicator of the continentality of the climate according to N.N. Ivanov with fixed values of the average height of the stands

Следует отметить, что выявленные взаимосвязи не являются определяющими фактическую продуктивность ввиду того, что при моделировании запаса не были учтены ни показатели пространственной структуры, ни почвенные характеристики. Общеизвестно, что именно эти показатели оказывают наибольшее влияние на формирование продуктивности древостоев. Однако именно они являются индикаторами влияния климата на лесорастительное районирование.

Существенное отклонение климатических условий от оптимальных ведет к изменению физиологических процессов в растениях, и как следствие – к ухудшению фитосанитарного состояния, породной и пространственной структуры лесов. Общеизвестны факты появления в лесном пологом так называемых окон, формирования групповой структуры древостоев и естественных редиц при продвижении от таежной зоны к степной. В результате таких изменений происходит снижение сомкнутости полога и продуктивности древостоев.

Таким образом, следует указать, что величина запаса в стандартных таблицах соответствует запасу, представленному в таблицах хода роста нормальных древостоев при фиксированных значениях высоты. Поэтому в географическом понимании изменение сомкнутости и полноты древостоев связано с критерием нормальности (максимальной продуктивности) древостоев, который следует рассматривать в зависимости от экологических факторов, и прежде всего – климатических.

Библиографический список

1. Герасимов Ю.Ю., Хлюстов В.К. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: применение в лесоуправлении и экологии: учебник для лесных вузов. – М.: МГУЛ, 2001. – 260 с.
2. Загребев В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мопкалёв. – М.: Колос, 1992. – 495 с.
3. Хлюстов В.К. Комплексная оценка и управление древесными ресурсами. Модели – нормативы – технологии. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 449 с. – URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/s23052022kniga2.pdf>.
4. Глызин А.В., Размахнина Т.Б., Корсунов В.М. Дендрохронологические исследования в контактной зоне «Лес-степь» как источник информации о ее динамике // Сибирский экологический журнал. – 2005. – № 1. – С. 79-83.
5. Комин Г.Е. Дендрохронологический анализ динамики радиального прироста пихты кавказской // Лесное хозяйство Северного Кавказа: сборник научных трудов. – Вып. 25. – Сочи: ФГУ «НИИгорлесэкол», 2007. – С. 152-163.
6. Матвеев С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 272 с.
7. Молчанов А.А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды / АН СССР, Лаборатория лесоведения. – М.: Наука, 1976. – 168 с.

Выводы

1. Общая модель регрессии запасов чистых по составу полных сосновых древостоев для 17 субъектов РФ ЦФО является статистически достоверной, характеризуется очень высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,999$); низким значением стандартной ошибки ($E = \pm 2,1\%$); высоким значением F-критерия Фишера ($F = 1399,9$ при $P < 0,05$) и значимостью численных коэффициентов по t-критерию Стьюдента ($t > t_{05} = 1,96$).

2. Влияние климатических показателей: испаряемости, годового показателя увлажнения, суммы активных температур и показателя континентальности климата по Н.Н. Иванову – на запас чистых по составу нормальных сосновых древостоев ЦФО является достоверным и статистически подтвержденным, на что указывают коэффициенты детерминации, значения которых находятся в диапазоне от 0,325 до 0,582. Расчетные значения F-критерия Фишера больше теоретических на 1-процентном уровне значимости в 13 случаях из 16 ($F_{\text{расч.}} > F_{01} = 7,9$) и в 3 случаях – на 5-процентном уровне значимости.

3. Обосновано опосредованное влияние на стандартный запас нормальных древостоев показателей климата в силу изменения пространственной структуры древостоев (полноты) при продвижении с севера на юг от зоны лиственных лесов до лесостепной зоны.

References

1. Gerasimov Yu.Yu., Khlyustov V.K. Matematicheskie metody i modeli v raschetah na EVM: primeneniye v lesoupravlenii i ekologii: uchebnyk dlya lesnykh vuzov. – M.: MGUL, 2001. – 260 s.
2. Zagrebey V.V. Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov / Sukhih V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. – M.: Kolos. 1992. – 495 s.
3. Khlyustov V.K. Kompleksnaya otsenkai upravleniye drevesnyimi resursami. Modeli – normativy – tehnologii. – M.: Izd. RGAU-MSHA imeni Timiryazeva, 2015. – 449 s. <http://elib.timacad.ru/dl/full/s23052022kniga2.pdf>
4. Glyzin A.V., Razmahnina T.B., Korsunov V.M. Dendrokhronologicheskie issledovaniya v kontaktnoy zone «les – step» kak istochnik informatsii o ee dinamike // Sibirsky ekologichesky zhurnal. – 2005. – № 1. – S. 79-83.
5. Komin G.E. Dendrokhronologichesky analiz dinamiki radialnogo prirosta pihty kavkazskoy // Lesnoye hozyajstvo Severnogo Kavkaza. Sb. nauchnykh trudov, vyp. 25. – Sochi: FGU «NIIGorlesekol», 2007. – S. 152-163.
6. Matveev S.M. Dendroindikatsiya dinamiki sostoyaniya osnovnykh nasazhdenij Tsentralnoj lesostepi. – Voronezh: VGU, 2003. – 272 s.
7. Molchanov A.A. Dendroklimaticheskie osnovy prognozov pogody / AN SSSR, Lab. lesovedeniya. – M.: Nauka, 1976. – 168 s.
8. Metody dendrokhronologii. Chast I. Osnovy dendrokhronologii. Sbor i poluchenie drevesno-koltsevoj

8. Методы дендрохронологии. – Ч.1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учебно-методическое пособие / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов и др. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.

9. **Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.** Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // Известия РАН. Серия «Географическая». – 2009. – № 2. – С. 57-68.

10. **Замолодчиков Д.Г., Краев Г.** Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. – 2016. – № 4 (48). – С. 23-31.

11. **Шиятов С.Г.** Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата: научное издание. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 215 с.

12. **Lucht W., Schaphoff S., Erbrecht T.** et al. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change // Carbon Balance and Management. – 2006. – Vol. 1. – Pp. 1-7.

13. **Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F.** et al. Climate induced borealforest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change. – 2007. – V. 56. – № 34. – Pp. 274-296.

14. **Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F.** Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // Climatic Change. – 2014. – V. 127. – Pp. 257-271.

15. **Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.** Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России; Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. – М.: ТЕИС, 2003. – С. 69-98.

16. **Малевский-Малевич С.П.** Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий / Е.К. Молькентин, Е.Д. Надёжина и др. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 3. – С. 14-24.

17. **Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б.** Лесные пожары при потеплении климата в XXI веке // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 300-314.

18. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1, 2. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

19. Материалы по природно-экономической характеристике сельскохозяйственных микрорайонов СССР. Ч. I. – М.: Изд-во экономической литературы, 1962. – 999 с.

20. Архив климатических данных. – URL: <http://climatebase.ru/regions/Russia>.

Критерии авторства

Хлюстов В.К., Васенёв И.И., Ганихин А.М. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

informatzii: uchebno-metodicheskoe posobie / Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirilyanov A.V. i dr. – Krasnoyarsk: KrasGU, 2000. – 80 s.

9. **Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A.** Vliyaniye klimaticheskikh izmenenij na rastitelnyy pokrov Evropejskoj Rossii // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. – 2009. – № 2. – S. 57-68.

10. **Zamolodchikov D.G., Kraev G.** Vliyaniye izmenenij klimata na lesa Rossii: zafiksirovannyye vozdeystviya i prognoznye otsenki // Ustoichivoye lesopolzovanie. – 2016. – № 4 (48). – S. 23-31.

11. **Shiyatov S.G.** Dinamika drevesnoj i kustarnikovej rastitelnosti v gorah Polyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenij klimata: nauchnoye izdanie. – Ekaterinburg, UrO RAN, 2009. – 215 s.

12. **Lucht W., Schaphoff S., Erbrecht T.** et al. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change // Carbon Balance and Management. 2006 V. 1 P. 1-7.

13. **Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F.** et al. Climate induced borealforest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change. 2007 V. 56 № 34. P. 274-296.

14. **Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F.** Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // Climatic Change. 2014 V. 127 P. 257-271.

15. **Korovin G.N., Zukert N.V.** Vliyaniye klimaticheskikh izmenenij na lesnye pozhary v Rossii / Sb. Klimaticheskie izmeneniya: vzglyad iz Rossii; pod red. V.I. Danilova Danilyana. – M.: TEIS, 2003. – S. 69-98.

16. **Malevsky-Malevich S.P.** Analiz izmeneniya pozharoопасnoj obstanovki v leash Rossii v XX i XXI vekah na osnove modelirovaniya klimaticheskikh uslovij / Moljkentyn E.K., Nadezhina E.D. i dr. // Meteorologiya i gidrologiya. – 2007. – № 3. – S. 14-24.

17. **Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B.** Lesnye pozhary pri poteplenii klimata v XXI veke // Problemy ekologicheskogo monitoring i modelirovaniya ekosistem. – 2013. – T. 25. – S. 300-314.

18. **Drejper N., Smith G.** Prikladnoj regressiionnyy analiz. Kn. 1, 2. – M.: Finansy i statistika, 1986. – 366 s.

19. Materialy po prirodno-ekonomicheskoy karakteristike selskohozyajstvennykh mikrorajonov SSSR. Ch. I. – M.: Izd. – vo ekonomicheskoy literatury, 1962. – 999 s.

20. Climatebase.ru. Arhiv klimaticheskikh dannyh: <http://climatebase.ru/regions/Russia>

Criteria of Authorship

Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Gahikhin A.M. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Gahikhin A.M. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 21.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022