

УДК 620.95

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛЕСОВ РОССИИ

Член-корреспондент РАН В. В. Клименко*, А. Г. Терешин, О. В. Микушина

Поступило 19.12.2018 г.

Биотопливо является важным источником, в настоящее время обеспечивающим около 10% мировой потребности в энергии, в том числе 2% выработки электроэнергии и 2,5% объёма потребления жидкого топлива. В России древесное топливо является одним из наиболее доступных и значительных по запасам источников возобновляемой энергии. В работе исследованы возможные изменения энергетического потенциала лесных ресурсов России в результате изменений состава атмосферы и климата. Представлены оценки глобальных изменений концентрации CO₂ и среднегодовой температуры воздуха на территории России на период до 2050 г., сделанные с использованием климатической модели и модели углеродного цикла, разработанных в МЭИ. Проведённые расчёты показывают, что изменение биопродуктивности лесов России в результате роста содержания CO₂ в атмосфере, повышения температуры и возрастания количества осадков приведёт к увеличению доступных энергетических ресурсов древесного топлива к середине столетия на 30%, или более чем на 9 млн т у.т./год.

Ключевые слова: лесные ресурсы России, энергетический потенциал, древесное топливо, биопродуктивность, температура воздуха, осадки, концентрация CO₂, модель, прогноз.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886612-618>

Биотопливо является важным источником энергии, в настоящее время обеспечивающим около 10% мировой потребности в энергии, и это почти столько же, сколько дают гидро- и атомная энергетика вместе взятые. В основном это так называемые некоммерческие ресурсы – дрова и сельскохозяйственные отходы, используемые как топливо в домашних хозяйствах. Однако в последнее время увеличивается и объём коммерческих биоресурсов, применяемых для выработки тепловой и электрической энергии (более 2% от суммарной мировой электрогенерации в 2018 г.), а также в качестве моторного топлива (более 2,5% от мирового потребления жидкого топлива в 2018 г.). В последние 15 лет темпы роста энергетического использования биомассы (около 6% в год) в пять раз превышают средние темпы роста потребления энергии в мире.

В России биотопливо в настоящее время составляет основу нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ): в 2015 г. 90% тепловой и электрической энергии, произведённой из НВИЭ, обеспечили древесное топливо, сельскохозяйственные отходы и биогаз, причём вклад двух последних видов топлива был ничтожен (табл. 1). В настоящей работе пересчёт электрической и тепловой энергии в первичную энергию проводился по среднему удельному расходу топлива в России на КЭС

(0,326 г у.т./кВт·ч) и в котельных (166 кг у.т./Гкал) соответственно. Доля биогенерации в России оказывается немного выше, чем в среднем по миру, и составляет 2–3% от общей выработки электроэнергии.

Биотопливо, как и другие НВИЭ, сегодня рассматривается как привлекательная альтернатива органическому топливу, безопасная с позиций антропогенного воздействия на атмосферу и климат. В целом ряде научных работ рассматриваются различные аспекты использования биоресурсов в энергетике [1, 2], оценивается их воздействие на глобальный цикл углерода и тепловой баланс атмосферы [3, 4], изучаются последствия климатических изменений для лесных экосистем [3–5]. Настоящая работа посвящена оценке изменений энергетического потенциала лесных ресурсов в России, связанных с глобальными изменениями углеродного цикла и региональными изменениями климата на территории страны. Ставилась задача рассчитать изменения размера доступных древесных ресурсов, пригодных для энергетического использования, вызванные повышением биопродуктивности лесов за счёт увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и изменения климатических условий. При этом энергетический потенциал лесов России огромен: в них ежегодно продуцируется не менее 4 млрд тонн органического углерода, или 5 млрд тонн в пересчёте на условное топливо (у.т.), т.е. в пять раз больше годового энергопотребления страны.

Национальный исследовательский университет “МЭИ”,
Москва

*E-mail: nilgpe@mpei.ru

Таблица 1. Структура потребления возобновляемых энергоресурсов в России (млн т у.т.)

Ресурсы	Годы			
	2000	2005	2010	2015
Гидро- (без больших ГЭС)	0,227	0,242	0,261	0,267
Солнце	0,000	0,000	0,009	0,105
Ветер	0,001	0,002	0,001	0,047
Геотермальные	0,018	0,131	0,158	0,148
Биотические	4,000	4,328	5,001	5,246
НВИЭ, всего	4,246	4,703	5,429	5,813
в том числе				
древесина	3,929	4,248	4,860	5,099
сельскохозяйственные отходы	0,036	0,036	0,084	0,071
биогаз	0,035	0,044	0,057	0,075
Кроме того, дрова	4,647	5,011	4,195	4
Биоресурсы, всего	8,647	9,339	9,196	9,246
из них древесина	8,576	9,259	9,055	9,099

Примечание. Источник данных – Росстат.

Лесная промышленность России, как и другие отрасли экономики страны, в последние десятилетия претерпевала радикальные изменения (рис. 1). После двукратного роста лесозаготовок в послевоенное время (со 150 млн м³ в 1945 г. до 350 млн м³ в 1960 г.) наблюдался 30-летний период стабильно высоких объёмов вывозки древесины, сменившийся резким спадом в 1990-е годы [6]. Минимум заготовки леса был достигнут в 1998 г. на уровне 100 млн м³, после чего начался период стабильного роста объёмов рубок, превысивших в 2017 г. 200 млн м³ [1].

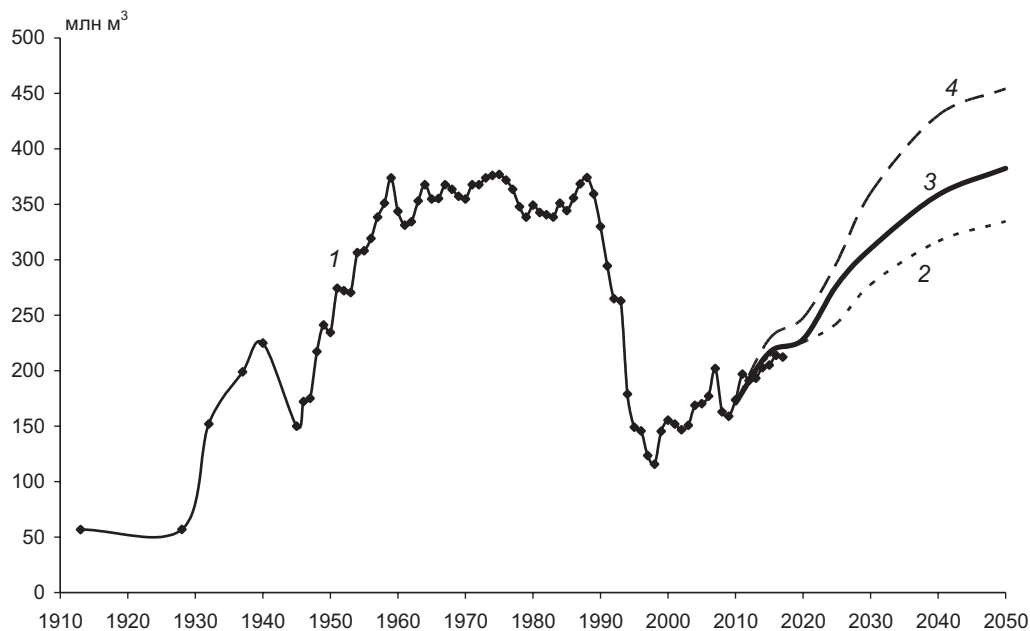


Рис. 1. Объёмы заготовки древесины в России: данные Росстата для 1910–2017 гг. (1) и сценарии [5], экстраполированные до 2050 г.: инерционный (2), умеренный (3) и инновационный (4). Здесь и далее применяются так называемые плотные кубометры.

Таблица 2. Доля древесины, используемой в качестве топлива (кроме дров для населения), в общем объёме заготавливаемой деловой древесины в некоторых странах

Страна	Годы			
	2000	2005	2010	2015
США	0,26	0,27	0,36	0,36
Канада	0,16	0,18	0,22	0,19
Швеция	0,19	0,10	0,28	0,25
Финляндия	0,20	0,24	0,34	0,24

Примечание. Источники данных – ООН и FAO.

Данные различных источников по энергетическому использованию древесины в России сильно разнятся [1]. Анализ официальных материалов Росстата, Рослесхоза и Минэнерго, вызывающих сильные сомнения специалистов лесной отрасли [1, 2, 5], позволяет заключить, что в последние десятилетия в качестве топлива использовалось около 40 млн м³ древесины в год, из которых примерно половину составляли дрова для населения, а оставшуюся часть – древесные отходы, используемые на электростанциях и в котельных. По нашим данным, действительный масштаб энергетического использования древесины существенно выше и составляет не менее 50–60 млн м³.

Для оценки потенциальных объёмов использования древесных ресурсов в энергетике были взяты данные по применению в качестве топлива отходов лесозаготовок и деревообработки, а также утилизации продукции из дерева в странах – крупнейших производителях древесины (табл. 2). Как видно, в



Рис. 2. Объёмы энергетического использования древесины в России: данные Росстата для 1992–2017 гг. (1) и сценарии [5], экстраполированные до 2050 г.: инерционный (2), умеренный (3) и инновационный (4), а также объёмы заготовки дров (5).

указанных странах 20–30% объёма заготовленной деловой древесины находит применение в качестве топлива. В России в настоящее время этот показатель находится на уровне 10%, но для перспективной оценки нами использовано значение 25%.

Для расчётов объёма лесозаготовок был использован средний (“умеренный”) из разработанных совместно специалистами FAO и Рослесхоза сценариев [7], экстраполированный до 2050 г. Согласно этому сценарию, возможный объём заготовки древесины в России к середине текущего столетия может достичь 380 млн м³/год, что соответствует средним объёмам рубок за период 1960–1990 гг. Таким образом, энергетическое использование лесных ресурсов к 2050 г. может составить 95 млн м³. С учётом консервативной оценки децентрализованной заготовки дров для населения в 20 млн м³/год суммарный объём древесного топлива в России может составить около 115 млн м³/год, или, оценивая теплотворную способность древесины в 0,266 т у.т./м³, более 30 млн т у.т./год.

Однако эти расчёты справедливы для неизменных природно-климатических условий. Наша же планета переживает период беспрецедентных в исторических масштабах изменений содержания углекислого газа — основного источника питания растений — и температурно-влажностных характеристик климата, которые определяют величину биопродуктивности лесов.

В результате многолетних исследований в различных естественных экосистемах [8] достаточно

надёжно установлены зависимости первичной нетто-продуктивности (запасания углерода растениями) деревьев от климатических параметров. В диапазоне среднегодовых температур от –5 до 10 °С и годового количества осадков от 200 до 1000 мм, соответствующем зонам лесных экосистем России, увеличение чистой биопродуктивности лесов *NPP* (Net Primary Production) составляет 0,34 т С/га с повышением температуры воздуха на 1 градус и 0,07 т С/га с увеличением количества осадков на 10 мм/год, что полностью подтверждается результатами детальных исследований последних лет [9, 10].

Чувствительность наземной растительности к изменению концентрации углекислого газа в атмосфере оценивается различными моделями в очень широком диапазоне от 12 до 76% при удвоении концентрации CO₂ и в среднем ещё десять лет назад принималась равной 48%. Однако результаты многочисленных полевых испытаний, в том числе долговременных натуральных экспериментов FACE (Free-air CO₂ Enrichment) свидетельствуют о гораздо более сдержанном эффекте фертилизации, в среднем на уровне 20–25% [9]. В настоящей работе используется компромиссная оценка в 28%, соответствующая той, что используется в нашей боксово-диффузионной модели углеродного цикла с развитым биосферным блоком [11], которая применялась здесь для расчётов глобальных изменений содержания CO₂ в атмосфере. В качестве входных данных использовались сценарии антропогенного воздействия на атмосферу [12, 13], разработанные в НИУ “МЭИ” с учётом обязательств, принятых странами-участницами РКИК ООН на

Таблица 3. Доля заготовки древесины δV от суммарного объёма в России в 2008–2017 гг., запасы древесины W и её удельные значения w , площади лесов S , содержание углерода (C) в лесах C и его удельные значения c , прогнозируемые изменения температуры воздуха ΔT , количества осадков ΔP и биоэнергетических ресурсов δNPP к 2050 г. по сравнению с периодом 1971–2010 гг. по федеральным округам России

Федеральный округ	δV , %	W , млрд м ³	S , млн га	w , м ³ /га	C , Гт С	c , т С/га	ΔT , °С	ΔP , мм	δNPP (T), %	δNPP (P), %	δNPP (T, P, C), %
Центральный	10,7	4,0	23	176	2	72,2	2,5	7	18	1	31
Северо-Западный	25,8	10,4	89	118	4	48,4	1,9	9	16	1	29
Южный	0,4	0,5	3	167	0	68,7	2,5	4	14	1	26
Северо-Кавказский	0,1	0,3	2	163	0	67,1	2,5	2	14	0	25
Приволжский	15,9	5,7	38	151	2	61,9	2,3	7	19	1	32
Уральский	8,0	8,1	69	117	3	48,0	2,3	10	23	2	37
Сибирский	31,3	33,2	277	120	14	49,2	2,7	10	30	2	45
Дальневосточный	7,9	20,6	295	70	8	28,7	2,3	11	26	2	40
Россия	100,0	82,8	795	104	34	42,8	2,4	7,5	25	2	40

Примечание. Источник данных – Росстат, расчёты авторов.

основе Парижского соглашения (2015 г.), которое независимо от причин, по которым было принято, несомненно, задаёт долговременный тренд развития мировой энергетики. Результаты расчётов среднелобальной атмосферной концентрации CO₂ по базовому сценарию представлены на рис. 3. Прогнозируемое повышение концентрации диоксида углерода с 350 млн⁻¹ в 1990 г. до 460 млн⁻¹ к 2050 г. приведёт к увеличению NPP за этот период примерно на 10%.

Изменения температуры воздуха на территории России рассчитаны с помощью региональной климатической модели [14], сочетающей принципы динамического и статистического моделирования. Модельные оценки изменения среднегодовой температуры воздуха к середине нынешнего столетия на территории России представлены на рис. 4.

Следует отметить, что использованный в настоящей работе сценарий антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему находится в нижней части обширного диапазона аналогичных сценариев RCP, используемых в современных климатических моделях [13]. Согласно модельным расчётам на основе наиболее агрессивных из них, среднегодовая температура воздуха на планете к середине текущего столетия превысит доиндустриальный уровень на 3 градуса, а её изменения на территории России по сравнению с современными значениями составят 2,5–4 градуса [9]. Однако данные измерений состава атмосферы и температуры воздуха последних десятилетий вполне определённо говорят в пользу того, что наблюдаемые климатические изменения соответствуют реализации наиболее умеренных ва-

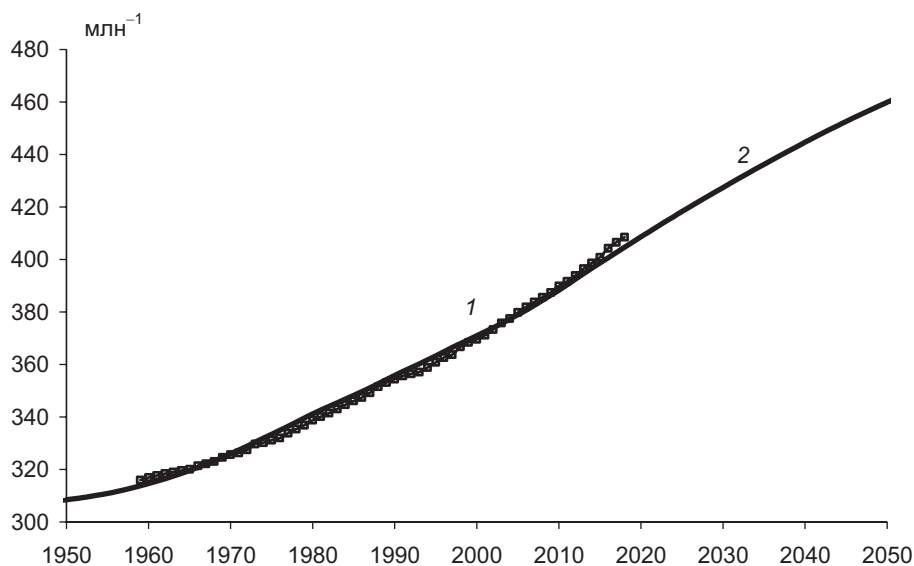


Рис. 3. Изменение среднелобальной атмосферной концентрации CO₂ по данным измерений (1) и модельному расчёту согласно базовому сценарию [12] (2).

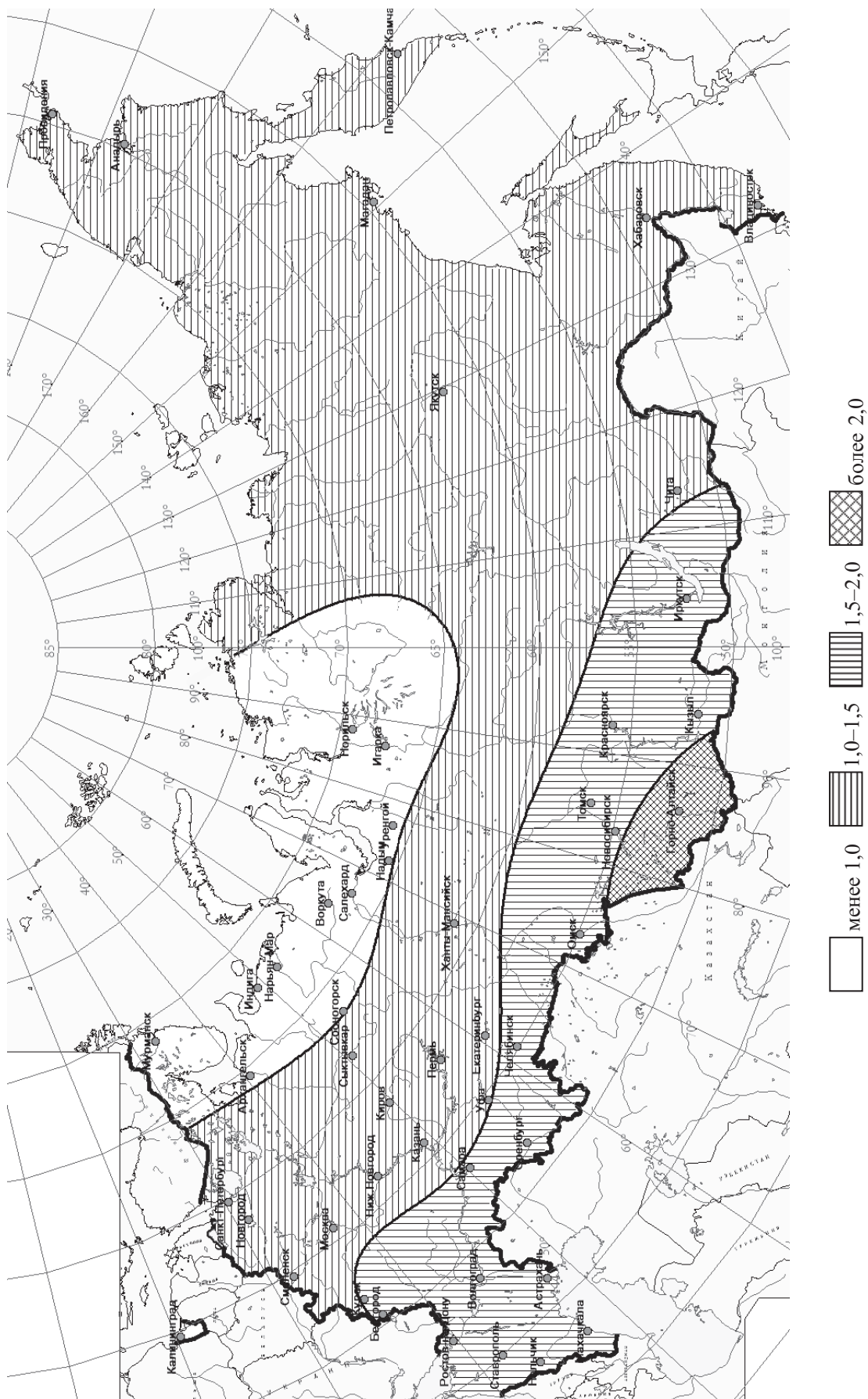


Рис. 4. Изменения среднегодовой температуры в градусах на территории России по сравнению со средним значением за 1971–2010 гг. к середине XXI в.

риантов [13], к которым относится и используемый в настоящей работе.

Результаты расчётов изменения чистой продуктивности лесов России к середине текущего столетия сведены в табл. 3.

Эти расчёты должны быть скорректированы на возможное увеличение потерь леса из-за ожидаемого распространения болезней и вредителей, которое оценивается примерно в 10% [2, 5]. Таким образом, в целом с тех же площадей вырубок к 2050 г. за счёт повышения биопродуктивности отечественных лесов можно будет заготовить примерно на 30% больше древесины, чем в последние десятилетия. Следовательно, обусловленное наблюдающимися и ожидаемыми природно-климатическими изменениями увеличение доступных энергетических ресурсов древесного топлива может к середине столетия составить более 9 млн т у.т., что по абсолютной величине значительно превышает климатические эффекты для других отраслей энергетики — как отрицательные для ТЭС и АЭС (ожидаемое снижение КПД тепловых циклов электростанций, что приведёт к дополнительному расходу топлива в 2,0 млн т у.т./год), так и положительные для ГЭС (вероятный рост электрогенерации на 4%, или 7–8 млрд кВт·ч/год, что эквивалентно снижению расхода топлива на 2,5 млн т у.т./год [15]).

В работе использованы данные Федеральной службы статистики России (Росстат, www.gks.ru), Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Росгидромета (ВНИИГМИ-МЦД, www.meteo.ru), Организации по продовольствию и сельскому хозяйству ООН (FAO, www.faostat.org), Международного энергетического агентства (IEA, www.iea.org), компании British Petroleum (www.bp.org), Национальной службы по исследованиям атмосферы и океана (NOAA, www.noaa.gov).

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 13.1137.2017/ПЧ) в части моделирования климатических изменений на территории России и РФФИ (грант № 17–08–00134) в части оценки потенциала энергетических биоресурсов в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин А.Б., Суханов В.С., Шереметьев Д.В. // Лесной вестник. 2010. № 4. С. 37–42.
2. Кракснер Ф., Ледук С., Фусс С., Щенащенко Д.Г., Швиденко А.З. // Сибирский лесной журнал. 2018. № 1. С. 16–25.
3. Gustavsson L., Haus S., Lundblad M., Lundström A., Ortiz C.A., Sathre R., Le Truong N., Wikberg P.-E. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 67. P. 612–624.
4. Giuntoli J., Agostini A., Caserini S., Lugato E., Baxter D., Marelli L. // Biomass and Bioenergy. 2016. V. 89. P. 146–158.
5. Замолодчиков Д., Краев Г. // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 23–31.
6. Колесников И.В., Велищанский В.М., Литвиненко Б.Д., Локшин М.М., Некрасов Н.С., Акимов В.М., Гурьев М.Д. Лесопользование в Российской Федерации в 1946–1992 гг. М.: Рослесхоз, 1996. 313 с.
7. Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года / Ред. М. Лобовиков и А. Петров. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций. Рим: ФАО, 2012. 96 с.
8. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
9. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri R.K. and Meyer L.A. (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
10. Schaphoff S., Reyera C.P.O., Schepaschenko D., Gertena D., Shvidenko A. // Forest Ecology and Management. 2016. V. 361. P. 432–444.
11. Klimenko A.V., Klimenko V.V., Fyodorov M.V., Snytin S.Yu. // Proc. of the 5th International Energy Conference. Seoul, Korea. 1993. V. 5. P. 56–61.
12. Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. // ДАН. 2016. Т. 468. № 5. С. 521–524.
13. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168.
14. Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G. // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 2017. DOI: 10.1117/12.2287753.
15. Klimenko V.V., Fedotova E.V., Tereshin A.G. // Energy. 2018. V. 142. P. 1010–1022. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.069

AN IMPACT OF ATMOSPHERIC AND CLIMATE CHANGES ON THE ENERGY POTENTIAL OF RUSSIAN FOREST RESOURCES

Corresponding Member of the RAS **V. V. Klimenko, A. G. Tereshin, O. V. Mikushina**

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation

Received December 19, 2018

Biofuels are an important source of energy, currently providing about 10% of the world energy demand, including 2% of power generation and 2,5% of liquid fuel consumption. Wood fuel in Russia is one of the most affordable and most important source of renewable energy resources. In this paper the possible changes of energy potential of the forest resources of Russia induced by changes in the atmosphere composition and climate are studied. The estimates of changes of the global carbon dioxide concentrations and mean annual air temperature across the Russian territory for the period up to 2050 are presented, simulated using global carbon cycle model and regional climate model developed in MPEI. It is projected that the change of net primary production of Russian forests due to an increase of CO₂ abundance in the atmosphere and raising both air temperature and precipitation will increase available energy resources of wood fuel at the mid-century by up to 30% or more than 9 million tce/year.

Keywords: forest resources of Russia, energy potential, wood fuel, net primary production, air temperature, precipitation, CO₂ concentration, model, projection.