

УДК 9.929+57.557+50.502/504

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ В ПОГЛОЩЕНИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И В АДАПТАЦИИ К ГЛОБАЛЬНОМУ ПОТЕПЛЕНИЮ (К ПАРИЖСКОМУ СОГЛАШЕНИЮ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА)

© 2023 г. Академик РАН В. М. Котляков^{1,*}, Э. Г. Коломыц^{2,**}, Л. С. Шарая³

Поступило 07.03.2023 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принято к публикации 13.03.2023 г.

На примере лесов Окского бассейна проведен опыт численного решения двуединой задачи, поставленной Парижским (2015) Соглашением по изменению климата: оценить поглощение лесными сообществами CO₂ из атмосферы при современном глобальном потеплении и их адаптацию к изменениям климата. С помощью эмпирико-статистического моделирования раскрыты механизмы регуляции лесным покровом углеродного цикла, с эффектом смягчения прогнозируемого потепления. Проведены оценки адаптивного потенциала лесов и его роли в адсорбции и консервации углерода. В качестве показателя адаптации использован предложенный индекс упруго-пластичной функциональной устойчивости лесных экосистем. Статистически установлена роль устойчивости лесов как прямого экологического фактора поглощения парниковых газов. Получена однозначная картина существенного роста экологических ресурсов бореальных и неморальных лесов — их адсорбционной способности при повышении адаптивного потенциала. Установлено, что в течение прогнозируемого 100-летнего периода общая упруго-пластичная устойчивость лесных формаций в регионе должна увеличиваться, особенно при современных темпах глобального потепления. За счет этого следует ожидать и значительное повышение способности бореальных и в меньшей степени неморальных лесов поглощать парниковые газы. Полученные результаты регионального прогнозного моделирования демонстрируют эффективность сопряженного исследования адсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату.

Ключевые слова: лесные экосистемы, современное глобальное потепление, поглощение и эмиссия парниковых газов, адаптация лесов к изменениям климата, экологические ресурсы лесных биомов, сопряженный экологический анализ, прогнозные эмпирико-статистическое моделирование

DOI: 10.31857/S2686739723600510, **EDN:** RZNLQA

Современное глобальное потепление продолжается на всем земном шаре и имеет, по всей видимости, антропогенное происхождение. Вычленение антропогенной составляющей из глобальных, в том числе климатогенных, изменений природной среды входит в стратегию перехода к устойчивому развитию [1, 2]. Климатические прогнозы, основанные на сценариях техногенных выбросов парниковых газов в атмосферу, предполагают повышение средней глобальной температуры поверхности Земли в пределах 1.4°–5.8° за период 1990–2100 гг., что в 2–10 раз боль-

ше величины потепления в XX в. [3]. Однако реальная картина значительно превосходит эти расчеты. Существующий в настоящее время тренд потепления приведет к повышению средней глобальной температуры к 2100 г. на 4° [4]. При этом потепление в некоторых регионах России может достигнуть 6°–11° [5]. Необходимо отметить, что малые внешние воздействия способны вызвать существенные глобальные изменения в биосфере [1].

В 2015 г. в Париже в ходе Конференции по климату в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата было достигнуто Соглашение, регулирующее меры по снижению углекислого газа в атмосфере с 2020 г. [6]. Согласно Статьям 2 и 4 Парижского Соглашения, странам-участникам необходимо стремиться к “...достижению баланса между возникающими в результате деятельности человека парниковыми газами и их поглощением морями и лесами — ко второй половине XXI века”, в целях удержания прироста средней глобальной температуры не выше 1.5°–2°.

¹ Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт фундаментальных проблем биологии Российской академии наук, Пущино, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

*E-mail: vladcot4@gmail.com

**E-mail: egk2000@mail.ru

Стабилизация окружающей среды на суше может быть достигнута через *процессы адсорбции парниковых газов* естественными, и прежде всего лесными, экосистемами.

С другой стороны, важной целью Парижского Соглашения является планирование действий в *области адаптации* – “укреплении адаптационных возможностей, повышении сопротивляемости и снижении уязвимости ... экологических систем к изменениям климата, в целях ... обеспечения адекватного адаптационного реагирования в контексте упомянутой выше температурной цели” (Статья 7 Соглашения). Таким образом, определена необходимость решения по лесным экосистемам *двухединой задачи* – *адсорбции и адаптации*, что позволит оценить регуляцию лесным покровом углеродного цикла, направленную на смягчение глобального потепления.

В данном сообщении изложен опыт регионального решения двухединой задачи на примере Окского бассейна (площадью около 250 тыс. кв. км). Проведен численный эксперимент по оценке влияния упруго-пластичной устойчивости лесных экосистем как показателя их адаптационного потенциала, а также прогнозируемых климатических параметров на углеродный баланс лесов, т.е. на их адсорбционную способность. Климатические параметры взяты из прогнозных сценариев двух глобальных моделей: 1) умеренной E GISS [7], отвечающей целям Парижского Соглашения, с ее ранней версией GISS-1993; 2) экстремальной HadCM3, версия A2 [8], дающей прогноз, адекватный современному тренду глобального потепления (см. выше).

В эксперименте использованы материалы крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок, проведенных ранее по специально разработанной методике на пяти экспериментальных полигонах Среднего и Верхнего Поволжья [9]. Каждый полигон характеризовал определенный экорегион. Базовое содержание и климатогенная динамика углерода оценивались по дискретным параметрам малого биологического круговорота: 1) скелетной древесно-кустарниковой фитомассе – *BS*; 2) массе корней – *BR*; 3) общей зеленой массе – *BV*; 4) массе лесной подстилки – *ML*; 4) мертвой скелетной надземной фитомассе (валеж и сухостой) – *WD*; 6) массе гумуса в органно-минеральном горизонте почвы – *HU*. Для прогнозирования этих параметров предварительно проводилась гидротермическая ординация их базовых значений в пространстве локальных ландшафтных сопряжений (катен) по каждому экорегиону [9]. Переход от самих геомасс к содержанию в них углерода выполнялся с помощью известных углеродных коэффициентов ([10, 11], и др.).

Оценки изменений содержания углерода в различных биотических компонентах и в целом

по лесным биогеоценозам проведены по известному лесоводственному методу [10, 12], основанному на динамике живых и мертвых фитомасс, а также лабильного гумуса. При этом реализуется кибернетический подход [13, 14], когда сами геомассы (углеродные пулы) рассматриваются как функциональные параметры на “выходе” системы, без анализа метаболических процессов “черного ящика”, что позволяет представить функциональные состояния биогеосистем как целостных образований, согласно [15].

Изменение массы потока углерода $\Delta C(F_a)$ в системе почва–растительность–атмосфера, т.е. углеродный баланс почвенно-растительного комплекса на данный прогнозный срок рассчитывали по формуле:

$$\Delta C(F_a) = \Delta C(WD) + \Delta C(ML) + \Delta C(HU) - \Delta C(BS) - \Delta C(BV) - \Delta C(BR). \quad (1)$$

Параметр $\Delta C(F_a)$ определялся для каждой группы биогеоценозов данного экорегиона. При положительных величинах первые три слагаемые правой части уравнения дают прибавку эмиссии CO_2 из почвенно-растительного покрова в атмосферу, а вторые – убыль этого потока. При отрицательных же значениях указанных слагаемых картина обратная. Таким образом, по прогнозируемому параметру $\Delta C(F_a)$ оценивалось, будет ли поглощать данный лесной биогеоценоз дополнительное количество CO_2 из атмосферы в результате сдвигов в биологическом круговороте или, наоборот, станет источником его дополнительных выбросов.

Переход с локального (аналитического) уровня на региональный (картографический) проведен с помощью специально разработанного метода индукционно-иерархической экстраполяции [16], а также с применением новых методов геоморфометрии [17]. Для этого были использованы спутниковые данные НАСА о рельефе – матрицы высот земной поверхности, полученные в ходе выполнения проекта SRTM30 “США–Италия–Германия” (2000 г.).

Количественная оценка адаптации лесных экосистем к меняющемуся климату проведена по их *упруго-пластичной устойчивости* [18], определяющей сукцессионно-восстановительный потенциал лесов. Как известно, в биологическом круговороте ключевое значение имеют два процесса: относительная величина продуцирования зеленого вещества и скорость его разложения. Они могут быть выражены двумя дискретными параметрами метаболизма – коэффициентом годового оборота надземной фитомассы ($KR = PV/BL$) и подстилочно-опадным индексом ($KY = PV/ML$). Здесь PV – годовая продукция зеленой массы (с генеративными органами), BL – общая живая надземная фитомасса, ML – масса

Таблица 1. Уравнения, описывающие связи изменения содержания углерода в лесных формациях Окского бассейна с их упруго-пластичной функциональной устойчивостью и с климатическими характеристиками

Растительные формации	Регрессионные уравнения	Статистика	
		R_s	P
А. Темнохвойные и широколиственно-темнохвойные леса	$\Delta C(F_a) = 62.4I(\text{уст}) + 22.7r_{\text{Year}} + 10.2t_{\text{July}} - 49.3$	0.50	$<10^{-6}$
Б. Сосновые леса	$\Delta C(F_a) = 38.6r_{\text{Year}} + 29.4t_{\text{July}} - 16.0I(\text{уст}) - 24.8$	0.46	$<10^{-6}$
В. Широколиственно-сосновые леса	$\Delta C(F_a) = 217.4I(\text{уст}) + 78.0t_{\text{July}} + 55.3r_{\text{Year}} - 165.6$	0.64	$<10^{-6}$
Г₁. Северные широколиственные леса с примесью ели	$\Delta C(F_a) = 6.23I(\text{уст}) - 4.65t_{\text{July}} + 4.30r_{\text{Year}} - 5.63$	0.46	$<10^{-6}$
Г₂. Южные остепненные широколиственные леса	$\Delta C(F_a) = 32.9t_{\text{July}} + 24.1r_{\text{Year}} - 54.3I(\text{уст}) - 19.6$	0.38	$<10^{-6}$
Д. Все лесные формации Окского бассейна	$\Delta C(F_a) = 76.3I(\text{уст}) + 36.9t_{\text{July}} + 31.1r_{\text{Year}} - 69.6$	0.13	$<10^{-6}$
Е. Все коренные лесные формации	$\Delta C(F_a) = 68.6t_{\text{July}} + 37.1r_{\text{Year}} - 3.4I(\text{уст}) - 51.0$	0.16	$<10^{-6}$
Ж. Все производные лесные формации	$\Delta C(F_a) = 123.5I(\text{уст}) + 22.8r_{\text{Year}} + 18.7t_{\text{July}} - 64.6$	0.30	$<10^{-6}$
И. Вторичные мелколиственные леса на месте сосновых	$\Delta C(F_a) = 2218I(\text{уст}) - 68.5t_{\text{July}} + 33.9r_{\text{Year}} - 83.2$	0.45	$<10^{-6}$
К. Вторичные мелколиственные леса на месте широколиственных	$\Delta C(F_a) = 10.7I(\text{уст}) + 6.0r_{\text{Year}} - 4.6t_{\text{July}} - 12.2$	0.13	$<10^{-6}$
Л. Леса южной лесостепи и северной степи	$\Delta C(F_a) = 95.4t_{\text{July}} - 78.3I(\text{уст}) + 47.5r_{\text{Year}} - 22.6$	0.54	$<10^{-6}$

лесной подстилки. С помощью метрики евклидова расстояния вычислялся индекс упруго-пластичной устойчивости $I_{\text{упр}}$ как функция указанных коэффициентов:

$$I_{\text{упр}} = 1 - \left[\sqrt{(\Delta KR)^2 + (\Delta KY)^2} \right] / \sqrt{2}, \quad (2)$$

где

$$(\Delta KR) = (KR_{\text{max}} - KR_i) / (KR_{\text{max}} - KR_{\text{min}}),$$

$$(\Delta KY) = (KY_i - KY_{\text{min}}) / (KY_{\text{max}} - KY_{\text{min}}).$$

Индекс упруго-пластичной устойчивости, таким образом, оценивается в безразмерных единицах, т.е. он указывает на определенную долю устойчивости изучаемой экосистемы от максимально возможной в данной статистической выборке.

Если $KR_i \rightarrow KR_{\text{max}}$ и $KY_i \rightarrow 0$, то $I_{\text{упр}} \rightarrow 1$. Параметр $I_{\text{упр}}$ лесной экосистемы характеризует ее способность к прохождению восстановительных сукцессий (упругость), либо к переходу в новое функциональное устойчивое состояние, при сохранении, с допустимой вероятностью, ее первичной структуры (пластичность).

На практике для Средней полосы Русской равнины параметр $I_{\text{упр}}$ можно рассчитать по следующим эмпирическим формулам, с достаточно высокими коэффициентами детерминации R^2 [9]:

$$I_{\text{упр}} = 0.715 - 0.0555KY; \quad R^2 = 0.90; \quad (3)$$

$$KY = 0.993t_{\text{Jan}} - 0.5365t_{\text{July}} + 0.003508r_{\text{Year}}; \quad R^2 = 0.61; \quad (4)$$

$$KY = \exp(6.453 - 0.2993t_{\text{July}}); \quad R^2 = 0.76. \quad (5)$$

Здесь t_{Jan} и t_{July} — соответственно средние температуры января и июля (в °C), r_{Year} — годовое количество осадков (в мм).

После процедуры присвоения мезо-катенам распределения каждой растительной формации значений индексов упруго-пластичной устойчивости и изменений содержания углерода был сформирован пул картографически привязанных данных (более 52000 точек). Пространственная вариабельность углеродного баланса лесов в связи с показателем их адаптивного потенциала в бассейне изучалась методами множественной регрессии.

В табл. 1 приводятся полученные статистические взаимосвязи показателей адсорбции $\Delta C(F_a)$ и адаптации $I_{\text{упр}}$ зональных/подзональных типов/подтипов лесных формаций, по классификации [12], с достаточно высоким уровнем значимости Пирсона ($P < 10^{-6}$). Здесь $\Delta C(F_a)$ — изменение удельного потока CO_2 (т/га год) в системе земная поверхность—атмосфера, t_{July} и r_{Year} — нормированные значения (в долях 1) средней темпе-

Таблица 2. Удельные и суммарные значения углеродных балансов лесных формаций на выборочной территории Волжского бассейна, прогнозируемые на 2100 г. при их базовой и конечной лабильной упругой устойчивости и по климатическим сценариям, согласно двум глобальным прогнозным моделям: умеренной GISS-93 и экстремальной HadCM3

Зональные типы и подзональные подтипы лесных формаций, по [19], (см. в тексте)	Средневзвешенный индекс упруго-пластичной устойчивости, $I_{упр}$		Прогнозируемые климатические параметры на 2100 г.				Удельный углеродный баланс, т/га		Лесо- покрытая площадь, кв. км	Суммарный углеродный баланс, млн т.		
			Модель GISS-93		Модель HadCM3							
	Базовый	Прогнозный		$t_{июля}, ^\circ C$	$r_{год}, мм$	$t_{июля}, ^\circ C$	$r_{год}, мм$	Модель GISS-93		Модель HadCM3		
		Модель GISS-93	Модель HadCM3									
А	0.554	0.630	0.670	20.1	950	22.2	725	9.70	8.87	75'706	73.435	67.151
Б	0.430	0.630	0.675	20.1	930	22.6	710	14.44	16.04	48'506	109.319	121.432
В	0.531	0.664	0.684	21.6	830	23.0	705	18.70	44.51	37'841	70.763	160.430
Г₁	0.547	0.667	0.689	22.2	780	23.8	685	57.83	82.76	18'350	218.835	313.172
Г₂	0.547	0.667	0.689	23.8	700	24.0	650	−2.32	−3.61	7'544	−4.257	−6.624
Заболоченные леса	0.549	0.630	0.672	20.1	940	22.4	720	−14.00	−10.83	7'052	−10.562	−8.170
								−17.86	−18.57		−13.434	−14.009
Неморальные поймы	0.559	0.642	0.685	22.5	770	23.6	680	8.12	6.61	16'267	5.726	4.661
								13.17	14.18		9.287	10.000
Средневзве- шенное/Сумма	0.517	0.634	0.673	20.4	921	21.0	717	3.61	10.02	211'266	179.376	284.281

t_{July} — средняя температура июля; r_{Year} — годовое количество осадков. В столбцах удельного и суммарного углеродного баланса первая строка характеризует баланс при базовом значении индекса устойчивости растительных формаций, а вторая — при его конечном значении (на прогнозный срок 2100 г.). Безлесные верховые и переходные болота не учитываются.

ратуры июля и годового количества осадков. Низкие в целом значения рангового коэффициента Спирмана R_s обусловлены огромным числом статистической выборки, где существенное “шумовое” воздействие оказывают местные геоморфологические и эдафические факторы, создающие группы средних с противоположными связями. Как известно [13], при описании сложных многокомпонентных биологических систем неизбежны нарушения базовых принципов статистического анализа. В частности, не соблюдается принцип линейной независимости предикторов, а коэффициенты корреляции и детерминации не могут быть высокими. Тем не менее по каждому уравнению общую тенденцию связей можно принять достоверной, о чем свидетельствуют упомянутые значения коэффициента Пирсона.

Каждый зональный/подзональный тип/подтип включает коренные и производные лесные сообщества, а также фрагментарные лесные угодья, т.е. он отображает состояние реального лесного покрова.

Уравнения (3)–(11) мы предлагаем включить напрямую в доработку утвержденных Минприродой России “Методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов” (Распоряжение № 20-р от 30.06.2017) в бореальных и неморальных лесах Средней полосы Европейской России. Для примера в табл. 2 приведены результаты расчетов (по формулам А–Г₂ в табл. 1) прогнозируемых удельных и суммарных значений углеродного баланса зональных/подзональных типов/подтипов лесных формаций всего Окско-Волжского бассейна по базовым и прогнозируемым величинам $I_{\text{упр}}$, а также по параметрам t_{July} и Year , которые заданы двумя различными глобальными климатическими моделями (см. выше). Согласно первой, умеренной, модели потепление к середине XXI в. составит в Среднем Поволжье от 0.2°–0.6° зимой до 0.8°–1.1° летом, что отвечает сценарию, который допускается Парижским Соглашением. Экстремальная же модель дает общегодовое повышение температуры к этому сроку на 2.5°–4.0°, которое может быть достигнуто при современных темпах глобального потепления.

В течение всего 100-летнего прогнозного периода общая упруго-пластичная устойчивость лесных формаций должна увеличиваться, причем в наибольшей мере при экстремальном потеплении. За счет этого следует ожидать и значительное повышение способности бореальных лесов поглощать парниковые газы и тем самым смягчать тренд самого потепления, что будет означать *увеличение их экологических ресурсов*, по определению [14]. Сопоставление значений углеродного баланса лесных формаций, полученных при начальных (базовых) и конечных (итоговых) индек-

сах функциональной устойчивости дает однозначную картину существенного роста адсорбционной способности хвойных и смешанных лесов с повышением их адаптивного потенциала.

Важно было также учесть изменение экологических ресурсов лесных формаций, которые могут быть вызваны их функционально-структурными преобразованиями в течение данного прогнозного периода. Эти изменения неоднозначны. По климатическим сценариям умеренного потепления (модель GISS-93) проведено алгебраическое сложение значений параметра $\Delta C(F_a)$ для зональных/подзональных типов/подтипов лесных формаций Волжского бассейна (см. табл. 2). Получены следующие *показатели изменений удельного углеродного баланса лесов* $\Delta[\Delta C(F_a)]$ (т/га): А – (+4.998); Б – (–14.570); В – (+27.773); Г₁ – (+10.010). В целом сохраняется потенциал экологических ресурсов всего спектра бореальных темнохвойных и темнохвойно-широколиственных, а также подтаежных широколиственно-сосновых лесов. Заметно возрастает адсорбционная способность чисто широколиственных лесов (главным образом за счет их предполагаемой трансформации в леса бореальные). В то же время южнотаяжные сосняки, переходя более чем на 50% в смешаннолесные сообщества, существенно утрачивают свои экологические ресурсы, хотя величина их $\Delta C(F_a)$ остается положительной.

Приведенные материалы в целом указывают на феномен роста адсорбционной способности лесного покрова Средней полосы Русской равнины при усилении самого сигнала глобального потепления и соответствующем повышении упруго-пластичной устойчивости экосистем. В этом можно убедиться, сопоставив значения $\Delta C(F_a)$ по моделям GISS-93 и HadCM3 (см. табл. 2). *Решающий вклад в консервацию лесами парниковых газов вносит рост их адаптивного потенциала*, играющего роль прямого экологического фактора смягчения климатических колебаний, в том числе современного потепления.

Таким образом, проведенное эмпирико-статистическое моделирование изменений углеродных балансов лесных формаций Окско-Волжского бассейна в зависимости от их упруго-пластичной устойчивости позволило вскрыть влияние механизмов адаптации лесов на их адсорбционный потенциал. Тем самым продемонстрирован один из путей решения двуединой проблемы, поставленной Парижским (2015) Соглашением, о необходимости сопряженного исследования адсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Котляков В.М.* Избранные сочинения. Книга 3. География в меняющемся мире. М.: Наука, 2001. 411 с.
2. *Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ. М.: "Логос", 2003. 576 с.
3. *Албриттон Д.Л., Баркер Т., Башмаков И.* Изменение климата. 2001 г. Обобщенный доклад МГЭИК / Под ред. Р.Т. Уотсона. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. 220 p.
4. *Le Quere C., Moriarty R., Andrew R.M.* Global carbon budget 2014 // *Earth Syst. Sci. data*. 2015. V. 7. Iss. 1. P. 47.
<https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
5. *Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Кракснер Ф., Онушин А.А.* Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // *Сибирский лесной журнал*. 2017. № 6. С. 3–25.
6. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11. Dec., 2015. 19 p.
7. *Hansen J., Sato M., Ruedy R.* Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // *Climate Dynamics*. 2007. V. 29. P. 661–696.
<https://doi.org/10.1007/s00382-007-0255-8>
8. *Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A.* The impact of new physical parametrizations in Hadley Centre climate model – Had-CM3 // *Climate Dynamics*. 2000. V. 16. P. 123–146.
9. *Коломыц Э.Г.* Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
10. *Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
11. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 253 с.
12. *Цельникер Ю.Л.* Газообмен CO₂ в лесных биогеоценозах // *Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении*. М.: Наука, 2006. С. 213–229.
13. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. Пер. с англ. М.: Изд-во Иност. лит-ры, 1959. 432 с.
14. *Шмальгаузен И.И.* Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968. 224 с.
15. *Сукачев В.Н.* Избранные труды. Т. 1-й. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.
16. *Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Шарая Л.С.* Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // *Экология*. 2009. № 6. С. 1–8.
<https://doi.org/10.1007/s00382-007-0255-8>
17. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.
18. *Одум Ю.* Экология. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328 с.
19. Растительность Европейской части СССР. Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М., ред. Л.: Наука, 1980. 429 с.
20. *Montgomery D.C., Peck E.A.* Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons. 1982. 504 p.
21. *Лосев К.С.* Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Изд-во "Космосинформ", 2001. 399 с.

ECOLOGICAL RESOURCES OF BOREAL FORESTS IN ABSORPTION OF GREENHOUSE GASES AND IN ADAPTATION TO GLOBAL WARMING (TO THE PARIS AGREEMENT ON CLIMATE CHANGE)

Academician of the RAS V. M. Kotlyakov^{a, #}, E. G. Kolomyts^{b, ##}, and L. S. Sharaya^c

^a Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Institute for Fundamental Problems of Biology, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation

^c D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: vladcot4@gmail.com

^{##} E-mail: egk2000@mail.ru

On the example of the forests of the Oka basin, an experiment was carried out to numerically solve the dual task set by the Paris (2015) Agreement on climate change: to assess the absorption of CO₂ from the atmosphere by forest communities under current global warming and their adaptation to climate change. With the help of empirical-statistical modeling, the mechanisms of forest cover regulation of the carbon cycle are revealed, with the effect of mitigating the predicted warming. Assessments of the adaptive potential of forests and its role in carbon adsorption and conservation have been carried out. The proposed index of elastic-plastic functional stability of forest ecosystems was used as an indicator of adaptation. The role of forest sustainability as a direct environmental factor in the absorption of greenhouse gases has been statistically established. An unambiguous picture of a significant increase in the ecological resources of boreal and nemoral forests has been obtained – their adsorption capacity with an increase in adaptive potential. It has been established that during the predicted 100-year period, the overall elastic-plastic stability of forest formations in the region should increase, especially at the current rate of global warming. Due to this, a significant increase in the ability of boreal and, to a lesser extent, nemoral forests to absorb greenhouse gases should also be expected. The obtained results of regional predictive modeling demonstrate the effectiveness of the coupled study of the adsorption capacity of forest biomes and their adaptation to a changing climate.

Keywords: forest ecosystems, modern global warming, absorption and emission of greenhouse gases, adaptation of forests to climate change, ecological resources of forest biomes, coupled ecological analysis, predictive empirical and statistical modeling