

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛЕСОВ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА В СМЯГЧЕНИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ (К Решению Парижского соглашения по изменению климата)

© 2025 Э.Г. Коломыц

Институт фундаментальных проблем биологии Пущинского научного центра РАН, г. Пущино,
Россия

Поступила 12.05.2025

Аннотация. Эмпирически обоснованы известные концептуальные положения об экологических ресурсах лесного покрова как его способности дополнительно поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата. На примере Волжского бассейна проведен региональный опыт численного решения двуединой задачи, поставленной Парижским (2015) Соглашением по изменению климата: рассчитать поглощение лесными сообществами CO₂ из атмосферы при современном глобальном потеплении, с учетом их адаптации к изменениям климата, и тем самым оценить регуляцию лесами углеродного цикла, которая должна способствовать смягчению потепления. Используются материалы крупномасштабных ландшафтных съемок, проведенных автором ранее в Среднем и Верхнем Поволжье. В качестве показателя адаптации предложен индекс упруго-пластичной устойчивости лесных экосистем. Методами множественной регрессии раскрыта пространственная вариабельность углеродного баланса лесов в связи с изменениями их адаптивного потенциала и с прогнозируемым на 2100 год климатом по глобальной модели HadCM3, которая адекватна современному беспрецедентно высокому росту глобального потепления. Установлен адсорбционный потенциал коренных и производных бореальных и неморальных лесов, оценена их способность смягчать климатические изменения, в том числе снижать антропогенное потепление. Получена картина существенного роста адсорбционной способности бореальных и неморальных лесов при повышении их упруго-пластичной устойчивости. Проведена количественная оценка потери экологических ресурсов лесами Волжского бассейна со времени начала в нем интенсивного лесо- и землепользования. Выявлены контрастные изменения экологических ресурсов бореальных и неморальных лесов в процессе глобального потепления. Ожидаемые в данном процессе структурные изменения бореальных и неморальных лесов в целом не должны существенно изменить их адсорбционный потенциал. Для начального периода глобального потепления (1990–2009 гг.) осуществлена верификация прогнозных моделей углеродного баланса Волжского бассейна по бореальным лесам Центральной Канады. Методами множественной регрессии проведена численная оценка влияния упругой устойчивости лесных формаций и прогнозируемых климатических условий на углеродный баланс лесов.

Ключевые слова: лесные экосистемы, глобальное потепление, поглощение и эмиссия парниковых газов, климатогенная устойчивость лесов, лесные экологические ресурсы, прогнозное эмпирико-статистическое моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Современное глобальное потепление является свершившимся фактом, и оно имеет, по всей видимости, антропогенное происхождение. Климатические прогнозы, основанные на сценариях техногенных выбросов парниковых газов в атмосферу, предполагают повышение средней глобальной температуры поверхности Земли в пределах 1,4–5,8°C за период 1990–2100 гг.,

что в 2–10 раз больше величины потепления, произошедшего в XX в. (Албриттон и др., 2003). Однако реальная картина значительно превосходит эти расчеты. По данным МГЭИК, существующие в настоящее время тренд потепления способен привести к повышению средней глобальной температуры к 2100 г. на 4°C (Le Quere et al., 2015). При этом региональное потепление на территории России может составить порядка 6–11° (Швиденко и др., 2017).

В 2015 году в Париже в ходе Конференции по климату в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата было достигнуто Согла-

Коломыц Эрланд Георгиевич, докт. геогр. наук, проф.,
ведущ. науч. сотр., egk2000@mail.ru

шение, регулирующее меры по снижению углекислого газа в атмосфере с 2020 г. (Paris Agreement, 2015). Согласно Статьям 2 и 4 Парижского Соглашения, во избежание экологической катастрофы 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°C. 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 лесами углеродного цикла, направленную на смягчение глобального потепления.

В данном сообщении изложен экспериментальный опыт регионального решения этой двухединой задачи на примере Волжского бассейна. Климатические параметры взяты из прогнозных сценариев двух глобальных моделей семейства общей циркуляции атмосферы AOGCMs. Известно, что модели AOGCMs наиболее сложны из всех климатических моделей и не имеют себе равных по пространственному разрешению и достоверности получаемых результатов (Тарко, 2005). Будучи трехмерными гидродинамическими моделями, они позволяют определить изменения как температуры, так и других важных климатических характеристик (осадков, влажности почвы и др.).

Первая модель – умеренная EGISS (Hansen et al., 2007), с ее ранней версией GISS-1993 (Hansen et al., 1988; Kolomyts, 2013). Она отвечает целям Парижского Соглашения. Модель достаточно хорошо имитировала наблюдаемые изменения глобального климата за период 1880–2003 г.г. и особенно за последние 3–4 десятилетия. Она реалистично отображает столетнюю климатическую динамику в пределах Европейского континента. Модель прогнозирует повышение глобальной температуры на 2,7–2,9°C при удвоении концентрации CO₂ в атмосфере, что соответствует эмпирическому диапазону чувствительности климата, установленному

по палеогеографическим данным (Hansen et al., 2007).

Вторая прогнозная модель HadCM3, версия A2 (Pope et al., 2000; Мохов, 2006) – экстремальная. Она дает прогноз, адекватный современному беспрецедентно высокому тренду глобального потепления (см. выше). Такие глобальные климатические изменения могут превысить порог выносливости основных лесобразующих пород и привести к распаду на обширных пространствах не только неморальных, но и бореальных лесов. Согласно данной модели, к концу XXI столетия среднеиюльские температуры в Среднем и Верхнем Поволжье вырастут на 4–6°, а среднеянварские – на 6,5–8,0°. Судя по современным температурным трендам, столь значительное региональное потепление представляется вполне реальным (Швиденко и др., 2017).

Базовым считается период инструментальных наблюдений 1881–1985 гг.

В качестве идеологической основы проведенного эксперимента использована выдвинутая новая экологически ориентированная парадигма в учении о лесе (Gorshkov, 1994; Уткин, 1995), которая содержит концептуальные положения об *экологических ресурсах лесного покрова* как его способности поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата. Эта регуляция направлена на возвращение среды в оптимальное для лесной экосистемы состояние и способствует сохранению относительной стабильности ее продукционного процесса в меняющемся климате, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла как ведущего звена биологического круговорота.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экологический эксперимент включает пять последовательных стадий: гипотезу, планирование, реализацию, статистический анализ и интерпретацию (Хелберт, 2008). В нашем эксперименте объектом исследования были не отдельные биогеоэкологические единицы, а разномасштабная система локальных и региональных биогеосистем с определенным типологическим разнообразием. «Зачастую эти крупномасштабные управляемые эксперименты лишены повторности воздействия ...», однако можно «... максимизировать ценность эксперимента, контролируя в нем возможно большее количество различных переменных» (Хелберт, 2008: с. 64–65). Именно в таком направлении должен осуществляться массовый ландшафтно-экологический эксперимент, что и было осуществлено нами на практике.

В эксперименте использованы материалы крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок, проведенных ранее по специально разработанной методике на восьми экспериментальных полигонах Среднего и Верхнего Поволжья (Коломыц, 2018). Каждый полигон характеризовал определенный экорегион (см. рис. 1).

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*; 5) мертвой скелетной фитомассе (валеж и сухостой) – *WD*;

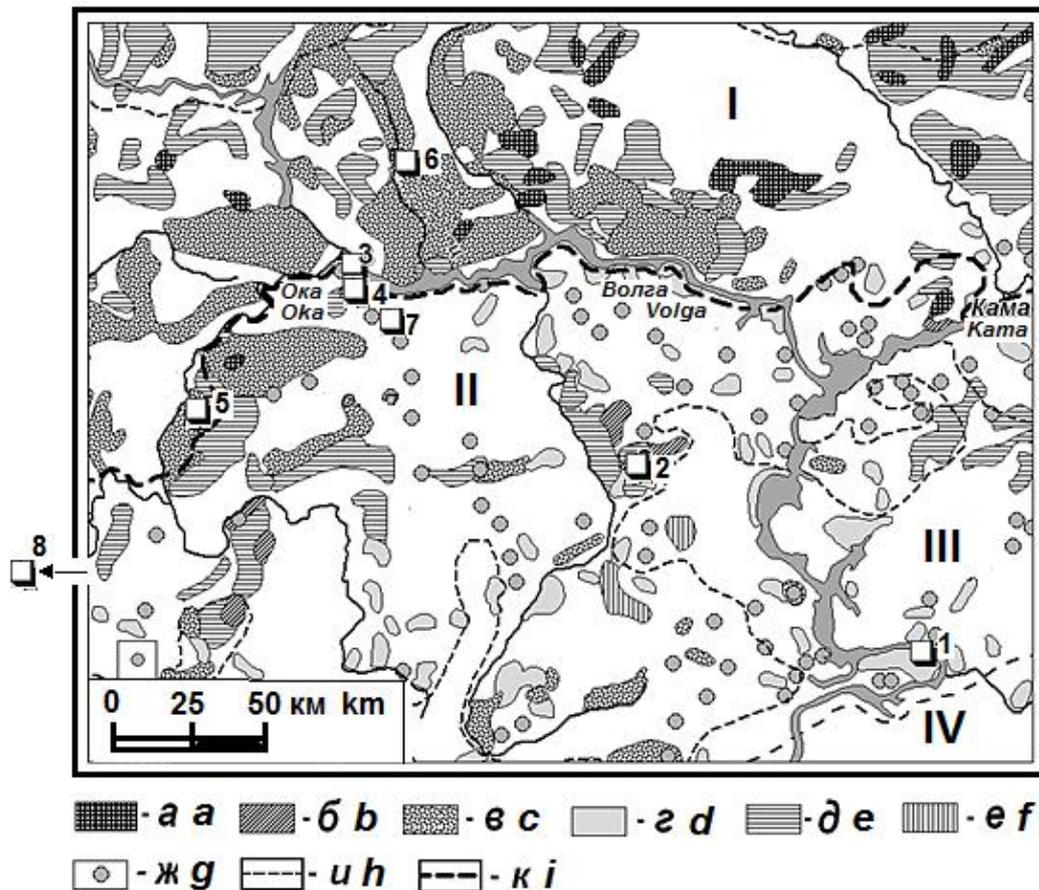


Рис. 1. Растительный покров Среднего Поволжья, по (Грибова и др., 1980), и схема расположения экспериментальных полигонов.

Условные обозначения. Природные зоны (подзоны): I – смешанные леса; II – широколиственные леса; III – типичная и южная лесостепь; IV – северная степь.

Леса: *a* – еловые, пихтово-еловые и черноольховые с елью; *b* – широколиственно-сосновые, местами с елью; *c* – сосновые (боры) и елово-сосновые (суборы); *г* – широколиственные; *d* – березово-осиновые и березово-липовые; *e* – березовые и сосново-березовые.

Остальные обозначения: *ж* – внесмасштабные ареалы широколиственных лесов; *и* – границы природных зон и подзон; *к* – Главный ландшафтный рубеж Русской равнины.

Экспериментальные полигоны: 1 – Жигули; 2 – Присурье; 3 – Щелоковский Хутор; 4 – Зеленый Город; 5 – Выкса; 6 – Керженец (Керженский заповедник); 7 – Кудьма; 8 – Приокско-Террасный заповедник (ПТЗ).

Fig. 1. Vegetation cover of the Middle Volga region, according to (Gribova et al., 1980), and the layout of the experimental sites.

Legend. Natural zones (subzones): I – mixed forests; II – broad-leaved forests; III – typical and southern forest-steppe; IV – northern steppe.

Forests: *a* – spruce, fir-spruce and black alder with spruce; *b* – broadleaf-pine, in places with spruce; *c* – pine (pine forests) and spruce-pine (subori); *г* – broadleaf; *d* – birch-aspens and birch-linden; *e* – birch and pine-birch.

Other designations: *ж* – non-scale areas of broadleaf forests; *и* – boundaries of natural zones and subzones; *к* – Main landscape boundary of the Russian Plain.

Experimental sites: 1 – Zhiguli; 2 – Prisurye; 3 – Shchelokovsky Khutor; 4 – Green City; 5 – Vyksa; 6 – Kerzhenets (Kerzhensky Nature Reserve); 7 – Kudma; 8 – Prioksko-Terrasny Nature Reserve.

б) массе гумуса в органно-минеральном горизонте почвы – *HU*. Переход от самих биомасс к содержанию в них углерода осуществлялся с помощью известных углеродных коэффициентов.

Для прогнозирования этих параметров предварительно проводилась термо- и гидроэдафическая ординация их базовых значений в пространстве локальных ландшафтных сопряжений (катен) по каждому экорегиону (Коломыц, 2018). Ординация проведена по двум наиболее репрезентативным геофизическим параметрам: температуре почвы на глубине 50 см (t_{50}) и запасам летней продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см (табл. 1). Корреляционные связи оказались не всегда достаточно высокими (коэффициент детерминации меняется от 0,25–0,30 до 0,65–0,70), хотя и вполне значимыми (критерий Пирсона $P = 1,0–2,5 \times 10^{-4}$). При слабой связи последнюю можно интерпретировать как некоторую общую

тенденцию изменений данного метаболического параметра под влиянием геофизического тренда на фоне «шумового» воздействия других факторов локального порядка (прежде всего, факторов литогенной основы ландшафтов). Как известно (Montgomery, Peck, 1982), 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. Диссимметризация и дробление гидротермических ниш, с преимущественно пуассоновским характером распределения биогеоценологических единиц, указывают на сложный, дифференцированный в пространстве процесс их климатогенных преобразований (Коломыц, 2018).

Таблица 1 / Table 1

Фрагмент расчетных моделей, описывающих изменения параметров малого биологического круговорота в биогеоценозах экорегионов Среднего и Верхнего Поволжья под влиянием трендов температуры и влагосодержания почвы в вегетационный период

Fragment of calculation models describing changes in the parameters of the small biological cycle in biogeocoenoses of the ecoregions of the Middle and Upper Volga River under the influence of trends in temperature and soil moisture content during the vegetation period

Вид модели (расчетная формула)*	Экспериментальные полигоны (см. рис. 1)	Параметры (см. в тексте)	Коэффициенты			Статистические характеристики**		
			b_0	b_1	b_2	R	P	S_y
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	7. Присурье	<i>BV</i> <i>HU</i>	21,93 5,99	-0,7415 0	-0,7135 55,75	0,664 0,696	0 0	3,09 20,29
	5. Зеленый Город	<i>BR</i> <i>HU</i>	8,712 16,34	5,838 -0,2402	-0,0678 0,07426	0,582 0,713	$0,1 \cdot 10^{-3}$ 0	17,92
	2. Щелоковский Хутор	<i>ML</i>	27,18	-2,333	0,04896	0,717	0	6,51
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2$	2. Щелоковский Хутор	<i>WD</i>	642,1	-114,7	5,142	0,936	0	2,21
$y = \exp(b_0 + b_1/x_1)$	1. Керженец	<i>WD</i> <i>HU</i>	22,85 8,84	-0,2588 0,0091	0,00149 0,0006	0,72 0,851	0 0	12,78 8,03
	4. Приокско-Террасный заповедник	<i>BS</i> <i>HU</i>	244,6 25,31	0,3956 0,0159	-0,00312 0,00042	0,557 0,577	$0,7 \cdot 10^{-3}$ $0,4 \cdot 10^{-3}$	71,4 16,32
	5. Зеленый Город	<i>ML</i> <i>WD</i>	0,0845 -4,389	35,08 64,63	- -	0,506 0,642	0 0	16,0 7,0
	3. Выкса	<i>ML</i>	0,3274	46,81	-	0,798	0	0,34

Примечания. * x_1 – температура почвы на глубине 50 см (t_{50}); x_2 – запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ($W-50$); x_3 – средневзвешенный (по массе древесины различных пород) возраст леса.

** R – коэффициент корреляции; P – уровень значимости (критерий Пирсона); S_y – стандартное отклонение.

Полужирным шрифтом выделены коэффициенты при значимых аргументах в уравнениях множественной регрессии.

Notes to the table. * x_1 – soil temperature at a depth of 50 cm (t_{50}); x_2 – reserves of productive moisture in the soil layer of 0–50 cm ($W-50$); x_3 – weighted average (by the mass of wood of various species) age of the forest.

** R – correlation coefficient; P – significance level (Pearson criterion); S_y – standard deviation.

Bold font indicates coefficients for significant arguments in multiple regression equations.

Оценки изменений содержания углерода в различных биотических компонентах и в целом по лесным биогеоценозам проведены по известному лесоводственному методу (Морозов, 1926), основанному на динамике живых и мертвых фитомасс, а также лабильного гумуса (Герасимов, 1976). Изменение массы потока углерода $\Delta C(Fa)$ в системе почва–растительность–атмосфера, т.е. углеродный баланс почвенно-растительного комплекса, на данный прогнозный срок рассчитывали по формуле:

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

Параметр $\Delta C(Fa)$ 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 $\Delta C(Fa)$ 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. Следует подчеркнуть, что рассчитываемые по уравнению (1) значения параметра $\Delta C(Fa)$ характеризуют *динамический* (так будем его называть) *углеродный баланс лесных экосистем*, обусловленный *изменениями баланса депозита и эмиссии углерода* в почвенно-растительном покрове под воздействием устойчивой смены климатических условий. Это, так сказать, баланс балансов: соотношение прогнозных балансов и баланса конца базового периода, который приходится примерно на 85-е–90-е годы XX столетия (Noughton et al., 1996). Динамический баланс коренным образом отличается от традиционного *статического углеродного баланса*, который рассчитывается для данных почвенно-геоморфологических и фитоценологических условий при стационарном климате (либо без учета каких-либо климатических изменений). Как правило, статичный углеродный баланс по своим абсолютным значениям на порядок больше, нежели баланс динамический.

Переход от локального уровня (масштабы 1: 50 000–100 000) к региональному (в масштабах 1:2 000 000–4 000 000) осуществлялся с использованием разработанного *метода индуктивно-иерархической экстраполяции*, подробно описанного в работе (Коломыц, 2018), а также мелкомасштабных геоботанических карт (Карта ..., 1974; Растительность ..., 1987), созданных при-

мерно в то же время, когда проводились нами ландшафтные съемки. Это было время окончания базового периода. Таким образом, можно говорить о полном временном соответствии полученного нами аналитического материала о состоянии лесных формаций Волжского бассейна с ареалами их распространения, представленными на указанных геоботанических картах. Содержание этих карт было использовано как исходный фактический материал для базовых и прогнозных экологических расчетов, в том числе по углеродному балансу лесных формаций.

Использованные нами геоботанические материалы 35–40-летней давности не потеряли своей актуальности до настоящего времени. Установлено (Разнообразие ..., 2012), что за период 1968–2008 гг. в Европейской части России площади земель, покрытых и не покрытых лесом, изменились на 6–8% , что едва превышает точность самого геоботанического картографирования. Несущественные изменения произошли и в породной структуре лесов. Доля хвойных пород в составе покрытых лесом земель снизилась на 4%, а доля мягколиственных пород увеличилась на 5%. Незначительно изменилось также соотношение площадей с различной возрастной структурой лесов; некоторые сдвиги коснулись лишь наиболее молодых и приспевающих древостоев. По спутниковым данным, в течение 2000–2015 гг. площадь лесов России сократилась всего на 2,4 % , причем у темнохвойных, светлохвойных и лиственных пород это уменьшение составило соответственно 7,8%, 1,9% и 5,8% (Барталев и др., 2016).

В основе метода экстраполяции лежит свойство *полизональности локальных экосистем* (Коломыц, 2018). Преимущество этого метода в том, что он напрямую использует данные крупномасштабных ландшафтных съемок. Применены также новые методы геоморфометрии (Shary et al., 2002), для чего были использованы спутниковые данные НАСА о рельефе – матрицы высот земной поверхности, полученные в ходе выполнения проекта SRTM30 «США–Италия–Германия» (2000 г.).

Количественная оценка адаптивного потенциала лесных экосистем проведена по их *функциональной фитоценотической устойчивости* (Коломыц, 2018). В биологическом круговороте ключевое значение имеют два процесса: относительная величина продуцирования зеленого вещества и скорость его разложения (Базилевич, Родин, 1969). Они могут быть выражены соответственно двумя дискретными параметрами метаболизма – коэффициентом годового оборота надземной фитомассы ($KR = PV/BL$) и подстилоч-

но-опадным индексом ($KY = PV/ML$). Здесь PV – годовая продукция зеленой массы, BL – общая живая надземная фитомасса, ML – масса лесной подстилки. С помощью метрики евклидова расстояния вычислялся индекс упруго-пластичной устойчивости $I(\text{упр})$ как функция указанных коэффициентов:

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

где $(\Delta KR) = (KR_{\max} - KR_i) / (KR_{\max} - KR_{\min})$;

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

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 $KR_i \rightarrow KR_{\max}$ 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).

Параметр $I(\text{упр})$ рассчитывался по следующим эмпирическим формулам, с достаточно высокими коэффициентами детерминации R^2 :

$$I(\text{упр}) = 0,715 - 0,0555 \times KY; R^2 = 0,90 \quad (3)$$

$$KY = 0,0993 \times t_{\text{январь}} - 0,5365 \times t_{\text{июль}} + 0,003508 \times r_{\text{год}}; R^2 = 0,61 \quad (4)$$

$$KY = \exp(6,453 - 0,2993 \times t_{\text{июль}}); R^2 = 0,76 \quad (5).$$

Здесь $t_{\text{январь}}$ и $t_{\text{июль}}$ – соответственно средние температуры января и июля (в °C), $r_{\text{год}}$ – годовое количество осадков (в мм).

По каждой растительной формации проведена процедура присвоения ее мезокатенам индексов упруго-пластичной устойчивости и изменений содержания углерода, в результате чего был сформирован пул картографически привязанных данных (более 52 000 точек). Пространственная вариабельность углеродного баланса лесов в связи с показателем их адаптивного потенциала в бассейне изучалась совместно с Л.С. Шарой методами множественной регрессии (Shary et al., 2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Адаптивно-восстановительный потенциал лесного покрова

Подавляющее большинство лесных формаций Окско-Волжского бассейна характеризуются высокой чувствительностью к первоначальным сигналам внешних возмущений, но в то же время – достаточно развитыми механизмами экогенетических сукцессий, олицетворяющих их упру-

гую устойчивость. Это означает, что экзогенная динамика функциональных и структурных параметров лесных экосистем региона отражает смену их первоначальной адаптивной стратегии в меняющейся окружающей среде на стратегию последующего устойчивого развития, стремящегося привести их в первоначальное состояние после «снятия» или даже ослабления возмущающих сигналов.

Распределение индексов лабильной устойчивости лесных формаций представлено на рис. 2. Коренные средне- и южнотаежные еловые и широколиственно-еловые подтаежные леса, распространенные по крайнему северу Волжского бассейна, имеют пониженную упруго-пластичную устойчивость обоих типов ($I(\text{упр}) = 0,35-0,37$). Несколько более высоким восстановительным потенциалом обладают их мелколиственные дрифты ($I(\text{упр}) = 0,41-0,45$). Средне- и южнотаежные сосновые леса на междуречьях левобережья Волги, Унжи и Ветлуги отличаются, наоборот, более высокой чувствительностью к климатическим сигналам, но менее развитыми механизмами функционального восстановления ($I(\text{упр}) = 0,36-0,40$). Контраст еще более резко выражен в подтаежных широколиственно-сосновых лесах Низменного Заволжья и Нижнего Приочья. Они весьма чувствительны к внешним сигналам, но способны к сравнительно быстрому функциональному восстановлению ($I(\text{упр}) = 0,46-0,50$ и выше). Примерно такое же соотношение резистентной¹ и упругой устойчивости имеют небольшие массивы широколиственных лесов, разбросанные по бассейнам Средней Оки, Мокши и Суры.

Прогнозируемые углеродные балансы лесных формаций

Рассмотрим эти балансы по модели HadCM3, которая, как уже говорилось, дает картину, согласованную с текущим трендом глобального потепления и поэтому представляется наиболее реальной. В целом в темнохвойных лесах Окско-Волжского бассейна депозит углерода почти на 70% превысит его эмиссию, однако из-за незначительной площади этих формаций их общий вклад в изменение углеродного баланса региона едва превысит 3% (табл. 2). Сосновые и широколиственно-сосновые леса будут положительно влиять на углеродный цикл, но гораздо более эффективно, чему будут способствовать их наибольшие площади в бассейне (см. рис. 1). К 2100 г. они смогут содержать более 50% массы углерода, депонированной во всех лесах региона. Широколиственные леса окажут слабо выражен-

¹ См., например, (Коломыц, 2018) (примеч. ред.).

ное положительное влияние на углеродный цикл весьма фрагментарного распространения этих лесов. Гораздо большее положительное влияние окажут сосновые и сосново-широколиственные леса, а также мелколиственные дериваты на месте еловых лесов. Этому будет способствовать их широкое распространение (см. табл. 2). Фрагментарные лесные угодья на обширных территориях сельскохозяйственных полей будут осуществлять преимущественно слабо выраженную положительную биотическую регуляцию угле-

родного цикла. К 2100 г. их углеродный баланс не превысит в среднем 2,5–5,0 т/га.

Для коренного лесного покрова (рис. 3, А) наиболее мощное сокращение парниковых газов в атмосфере и, следовательно, максимальное ослабление регионального потепления ожидается со стороны двух групп лесных формаций – среднетаежных пихто-ельников на северных водоразделах Среднего Поволжья, а также средне- и южнотаежных сосняков в бассейнах Унжи, Ветлуги и Средней Вятки по Низменному Заволжью.

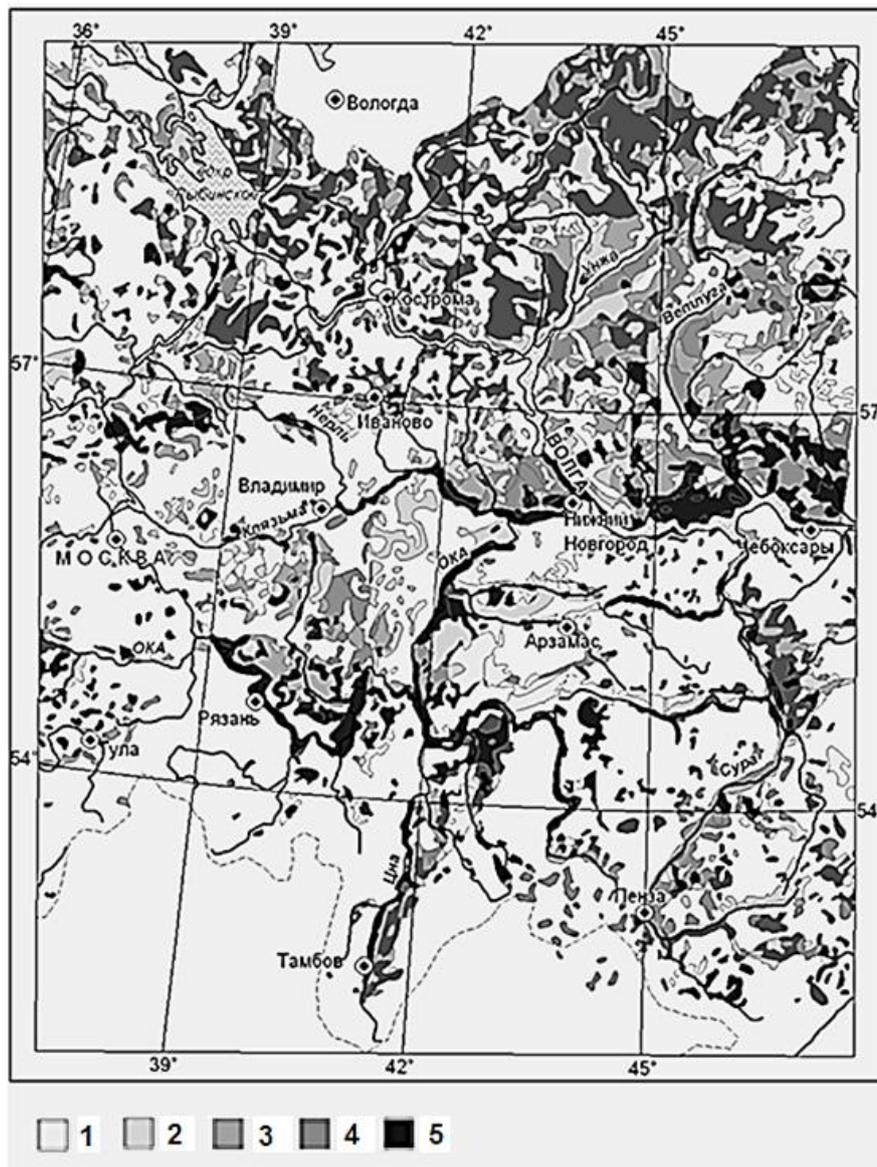


Рис. 2. Карта индексов упруго-пластичной лабильной устойчивости групп лесных ассоциаций территории Окско-Волжского бассейна. Масштаб 1: 4 100 000. Рассчитана и составлена совместно с Л.С. Шарой. Ареалы даны по «Карте растительности Европейской части СССР» (Карта ..., 1974).

Индексы устойчивости: 1 – $0,260 \div 0,355$; 2 – $0,356 \div 0,365$; 3 – $0,366 \div 0,393$; 4 – $0,394 \div 0,435$; 5 – $0,436 \div 0,580$.

Fig. 2. Map of indices of elastic-plastic labile stability of forest association groups in the Oka-Volga basin. Scale 1: 4,100,000. Calculated and compiled jointly with L.S. Sharaya. The areas are given according to the “Vegetation Map of the European Part of the USSR” (Vegetation map ..., 1974).

Stability indices: 1 – $0.260 \div 0.355$; 2 – $0.356 \div 0.365$; 3 – $0.366 \div 0.393$; 4 – $0.394 \div 0.435$; 5 – $0.436 \div 0.580$.

**Изменение суммарных запасов углерода (в млн. т) в лесных формациях
Окско-Волжского бассейна к 2100 г., согласно прогнозно-климатической модели HadCM3**
**Change in total carbon stocks (in mil. tons) in forest formations of the Oka–Volga basin by 2100,
according to the HadCM3 climate forecast model**

Группы лесных формаций (площадь, км ²)	Базовое содержание углерода	Изменение содержания углерода			
		депозит	эмиссия	общий итог	
				млн. т	%
Еловые и широколиственно-еловые (2 034)	37,14	3,02	–1,8	1,22	3,3
Сосновые и широколиственно-сосновые (26 230)	481,76	45,77	–23,17	22,60	4,7
Широколиственные (4 770)	84,68	6,76	–4,96	1,80	2,1
Вторичные на месте еловых (17 770)	293,26	40,77	–14,79	25,98	8,9
Вторичные на месте сосновых (16 670)	318,7	40,97	–51,0	–1,03	–3,2
Вторичные на месте широколиственных (16 911)	76,83	0,42	–1,18	–0,76	–1,0
Болотные (2 343)	35,18	1,01	–0,17	0,84	2,4
Пойменные (9 219)	149,28	6,62	–4,45	2,17	1,5
Все леса бассейна (83 947)	1 476,83	145,34	–101,52	43,82	3,0

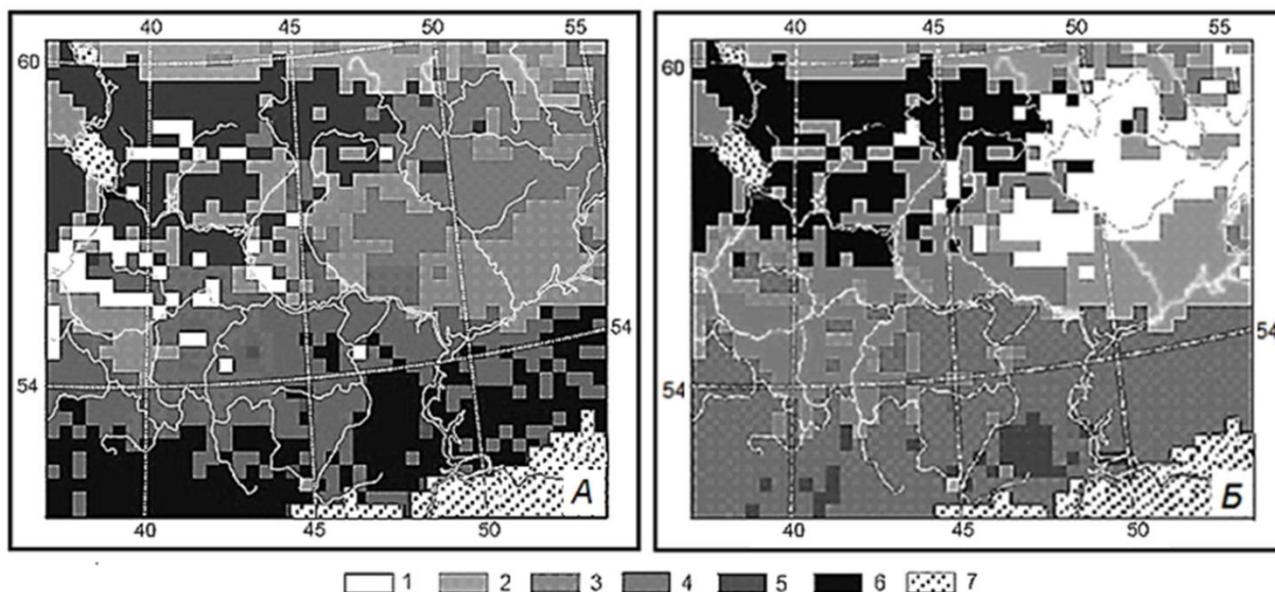


Рис. 3. Распределение удельного углеродного баланса восстановленных коренных лесных формаций (А) и реального лесного покрова Волжского бассейна (Б) для сценария экстремального потепления, согласно модели HadCM3, на срок 2100 г. Растровые карты рассчитаны и составлены Л.С. Шарой.

Углеродный баланс (т/га) для карты А: 1 – 32,5±26,0; 2 – 25,9±20,0; 3 – 19,9±15,0; 4 – 14,9±9,0; 5 – 8,9±2,0; 6 – 1,9±(–3,5).

Углеродный баланс (т/га) для карты Б: 1 – 24,0±20,0; 2 – 19,9±15,0; 3 – 14,9±7,0; 4 – 6,9±3,0; 5 – 2,9±(–4,0); 6 – (–4,1)±(–10,5).

Fig. 3. Distribution of the specific carbon balance of restored primary forest formations (A) and the actual forest cover of the Volga Basin (B) for the extreme warming scenario, according to the HadCM3 model, for the year 2100. Raster maps were calculated and compiled by L.S. Sharaya.

Carbon balance (t/ha) for map A: 1 – 32.5±26.0; 2 – 25.9±20.0; 3 – 19.9±15.0; 4 – 14.9±9.0; 5 – 8.9±2.0; 6 – 1.9±(–3.5).

Carbon balance (t/ha) for map B: 1 – 24.0±20.0; 2 – 19.9±15.0; 3 – 14.9±7.0; 4 – 6.9±3.0; 5 – 2.9±(–4.0); 6 – (–4.1)±(–10.5).

Почти столь же высоким экологическим ресурсом обладают подтаежные елово- и сосново-широколиственные леса в западном секторе бассейна (по левобережью Средней Оки). В коренных же лесах восточного сектора (камско-печерско-западноуральского) величина суммарного углеродного баланса снижается почти в четыре раза.

Прогнозные расчеты, проведенные для реального лесного покрова (коренных лесов + производных на их месте березовых и осиновых сообществ) выявили более чем двукратное снижение его адсорбционной способности по сравнению с чисто коренными лесами (рис. 3, Б). Таковой оказалась значительная потеря реальным лесным покровом возможностей смягчения климатических колебаний. Это касается в первую очередь восточноевропейской южной тайги, где восстановленный коренной лесной покров обнаруживает при экстремальном потеплении положительную регуляцию углеродного цикла, между тем как смесь коренных и производных лесов существенно увеличивает его отрицательную регуляцию. В подтаежных же широколиственно-темнохвойных лесах распространение березняков и осинников дает противоположный эффект – аномальное повышение положительного углеродного баланса. Особенно отчетливо это выражено в бассейне Вятки и на Ветлужско-Вятском междуречье.

Верификация прогнозных расчетов углеродного баланса

Для верификации были использованы аналитические и картографические материалы по депонированию/эмиссии углерода в лесах бореального пояса Центральной Канады. Такие данные получены с помощью повторного дистанционного зондирования на протяжении 1990–2000 гг. (начального периода современного потепления), а также наземных измерений и моделирования на центральную равнинную часть Канады – провинции Саскачеван и Манитоба (Gamon et al., 2004; Stinson et al., 2011). Это пространство «гудзоновской тайги», с мощными хвойными древостоями и с примесью лиственных пород, в том числе ясеня и бука (Власова, 1986).

Современные запасы углерода в бореальных лесах Волжского бассейна оцениваются в пределах 120–150 т/га. В лесах равнинной Центральной Канады они несколько ниже – 80–110 т/га. По данным прогнозной имитационной модели IMAGE2 (Alcamo et al., 1994), в обоих этих экорегионах поток углерода из наземных экосистем в атмосферу, обусловленный обезлесиванием, лесопользованием и возрастной динамикой лесовосстановления после пожаров и вырубок,

в 1990 г. составил не более 0,15–0,20 т/га, а к 2050 году должен увеличиться до 0,20–0,50 т/га. Можно полагать, что Волжский бассейн и Центральная Канада находятся и будут находиться в близких условиях лесопользования, что облегчает их сопоставимость по климатогенной динамике углеродного цикла.

По данным (Пузаченко, Скулкин, 1981), средние изменения *экосистемного стока углерода* в период 1990–2000 гг. в бореальных лесах Центральной Канады составили 0,041 т/га·год. Если же не считать сокращения стока углерода в 1995 и 1998 гг., когда в Центральной Канаде распространялись сильные лесные пожары, получим 0,080 т/га·год. К этой цифре приближаются наши расчетные данные среднегодового углеродного баланса по экстремальной модели HadCM3, прежде всего, для реального лесного покрова – 0,085 т/га·год. Модель же EGISS дает явно заниженные прогнозные результаты по сравнению с «канадским контролем». Для коренных и реальных лесов Волжского бассейна величины $\Delta C(F_a)$ по этой модели составляет соответственно 0,038 и 0,028 т/га·год. Данная модель предусматривает резкое снижение адсорбционного потенциала лесных биомов Волжского бассейна и соответствующую утрату ими регулирующей роли в смягчении климатических изменений.

Таким образом, для начальных десятилетий глобального потепления верификация наших прогнозных расчетов углеродного баланса дала положительные результаты только по экстремальной модели HadCM3 и не подтвердила углеродный прогноз по умеренной модели EGISS. Это, во-первых, подтверждает реальность экологических прогнозов, проведенных нами по климатической модели HadCM3, а во-вторых – указывает на проблематичность выполнения условий, заданных Парижским (2015) Соглашением по изменению климата (ограничение роста температуры к середине XXI в. величиной 1,5–2°C).

Опыт решения двуединой задачи – адсорбции и адаптации

В табл. 3 приводятся полученные нами совместно с Л.С. Шарой уравнения статистических взаимосвязей показателей адсорбции $\Delta C(F_a)$ и адаптации $I(\text{упр})$ зональных/подзональных типов/подтипов лесных формаций Окского бассейна, 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, $t_{\text{июля}}$ и $r_{\text{год}}$ – нормированные значения (в долях единицы) средней температуры июля и годового количества осадков. Климатические параметры взяты из прогнозных сценариев модели HadCM3 на 2050 г. Низкие

в целом величины рангового коэффициента Спирмана обусловлены огромным числом статистической выборки (более 52 000 точек), где существенное «шумовое» воздействие оказывают местные геоморфологические и эдафические факторы, создающие группы средних с противоположными связями. Тем не менее, по каждому уравнению общую тенденцию связей можно принять достоверной, о чем свидетельствуют упомянутые значения коэффициента Пирсона.

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

Для примера в табл. 4 приведены результаты расчетов (по формулам А–Г₂ в табл. 3) 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 $t_{\text{июля}}$ и $r_{\text{год}}$, 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 регионального 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, что будет означать *увеличение их экологических ресурсов*. Сопоставление значений углеродного баланса лесных формаций, полученных при начальных (базовых) и конечных (итоговых) индексах функциональной устойчивости (Коломыц, 2018) дает однозначную картину существенного роста адсорбционной способности хвойных и смешанных лесов с повышением их адаптивного потенциала. Установлено также, что в рассматриваемом нами 1–2-вековом прогнозом интервале структурная трансформация лесов в процессе глобального потепления не может оказать сколько-нибудь существенного влияния на углеродный цикл. Это подтверждает известное положение (Пузаченко, Скулкин, 1981) о том что продуктивность лесных формаций (а следовательно, и основная доля потоков CO₂) – функциональный параметр, весьма автономный от самой их структуры.

Таблица 3 / Table 3

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

Equations describing the relationships between changes in carbon content in forest formations of the Oka basin and their elastic-plastic functional stability and climatic characteristics

Растительные формации	Регрессионные уравнения	Статистика *)	
		R_s	P
А. Темнохвойные и широколиственно-темнохвойные леса	$\Delta C(F_a) = 62,4 \times I(\text{уст}) + 22,7 \times r_{\text{year}} + 10,2 \times t_{\text{Jul}} - 49,3$	0,50	$< 10^{-6}$
Б. Сосновые южнотаежные леса	$\Delta C(F_a) = 38,6 \times r_{\text{year}} + 29,4 \times t_{\text{Jul}} - 16,0 \times I(\text{уст}) - 24,8$	0,46	$< 10^{-6}$
В. Широколиственно-сосновые леса подтаежные	$\Delta C(F_a) = 217,4 \times I(\text{уст}) + 78,0 \times t_{\text{Jul}} + 55,3 \times r_{\text{ye}} - 165,6$	0,64	$< 10^{-6}$
Г ₁ . Северные широколиственные леса, с примесью ели	$\Delta C(F_a) = 6,23 \times I(\text{уст}) - 4,65 \times t_{\text{Jul}} + 4,30 \times r_{\text{year}} - 5,63$	0,46	$< 10^{-6}$
Г ₂ . Южные остепненные широколиственные леса	$\Delta C(F_a) = 32,9 \times t_{\text{Jul}} + 24,1 \times r_{\text{year}} - 54,3 \times I(\text{уст}) - 19,6$	0,38	$< 10^{-6}$
Вторичные мелколиственные леса на месте сосновых	$\Delta C(F_a) = 2218 \times I(\text{уст}) - 68,5 \times t_{\text{июля}} + 33,9 \times r_{\text{год}} - 83,2$	0,45	$< 10^{-6}$
Вторичные мелколиственные леса на месте широколиственных	$\Delta C(F_a) = 10,7 \times I(\text{уст}) + 6,0 \times r_{\text{год}} - 4,6 \times t_{\text{июля}} - 12,2$	0,13	$< 10^{-6}$
Леса южной лесостепи и северной степи	$\Delta C(F_a) = 95,4 \times t_{\text{июля}} - 78,3 \times I(\text{уст}) + 47,5 \times r_{\text{год}} - 22,6$	0,54	$< 10^{-6}$

Примечание. * R_s – ранговый коэффициент корреляции Спирмана; P – уровень значимости Пирсона.
Note to the table. * R_s – Spearman rank correlation coefficient; P – Pearson significance level.

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

Specific and total values of carbon balances of forest formations in the sample area of the Volga basin, projected for 2100 with their base and final labile elastic stability and climatic scenarios, according to two global forecast models: moderate GISS-93 and extreme HadCM3

Зональные типы и подзональные подтипы лесных формаций (см. табл. 3)	Средневзвешенный индекс упруго-пластичной устойчивости, $I(\text{упр})$		Прогнозируемые климатические параметры на 2100 г.				Удельный углеродный баланс, т/га, на 2100 г.		Лесопокрытая площадь, км ²	Суммарный углеродный баланс, млн. т, на 2100 г.		
	Базовый	Прогнозный		Модель GISS-93		Модель HadCM3		Модель GISS-93		Модель HadCM3	Модель GISS-93	Модель HadCM3
		Модель GISS-93	Модель HadCM3	$t_{\text{июля}}, ^\circ\text{C}$	$r_{\text{год}}, \text{мм}$	$t_{\text{июля}}, ^\circ\text{C}$	$r_{\text{год}}, \text{мм}$					
А	0,554	0,630	0,670	20,1	950	22,2	725	9,70 14,44	8,87 16,04	75 706	73,435 109,319	67,151 121,432
Б	0,430	0,630	0,675	20,1	930	22,6	710	9,23 6,03	12,82 8,90	48 506	44,771 29,249	62,185 43,170
В	0,531	0,664	0,684	21,6	830	23,0	705	18,70 57,83	44,51 82,76	37 841	70,763 218,835	160,430 313,172
Г₁	0,547	0,667	0,689	22,2	780	23,8	685	-5,58 -2,32	-5,26 -3,61	18 350	-10,239 -4,257	-9,652 -6,624
Г₂	0,547	0,667	0,689	23,8	700	24,0	650	-14,00 -17,86	-10,83 -18,57	7 544	-10,562 -13,434	-8,170 -14,009
Заболоченные леса	0,549	0,630	0,672	20,1	940	22,4	720	8,12 13,17	6,61 14,18	7 052	5,726 9,287	4,661 10,000
Неморальные поймы	0,559	0,642	0,685	22,5	770	23,6	680	3,37 3,13	4,69 11,53	16 267	5,482 5,092	7,676 18,871
Средневзвешенное / сумма	0,517 –	0,634 –	0,673 –	20,4 –	921 –	21,0 –	717 –	3,61 11,62	10,02 17,10	211 266	179,376 354,091	284,281 486,012

Примечание. $t_{\text{июля}}$ – средняя температура июля; $r_{\text{год}}$ – 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.

Note to the table. t_{July} is the average temperature in July; r_{year} is the annual amount of precipitation. In the columns of the specific and total carbon balance, the first row characterizes the balance at the base value of the stability index of plant formations, and the second – at its final value (for the forecast period of 2100). Treeless raised and transitional bogs are not counted.

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. 4). *Решающий вклад в повышение адсорбции лесами парниковых газов вносит рост их адаптивного потенциала*, играющего роль прямого экологического фактора. Сопоставление значений углеродного баланса лесных формаций, полученных при начальных (базовых) и конечных (итоговых) индексах устойчивости, дает однозначную картину существенного роста адсорбционной способности бореальных лесов с повышением их восстановительного потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенное прогнозное моделирование изменений углеродных балансов лесных формаций Окско-Волжского бассейна в зависимости

от их упруго-пластичной устойчивости проливает определенный свет на двуединую задачу, поставленную Парижским (2015) Соглашением, о необходимости сопряженного исследования адсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату.

2. Полученные регрессионные уравнения, по-видимому, можно включить напрямую в доработку утвержденных Минприроды России «Методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Приказ .., 2022) для бореальных и неморальных лесов Средней полосы Европейской России.

3. Оценивая результаты прогнозного эксперимента, нельзя не согласиться с резонным замечанием А.З. Швиденко (2012: с. 55) о том, что «... численные предсказания прогнозных моделей <...> должны рассматриваться <...> скорее как информация к размышлению о вероятных будущих траекториях лесов <...>, принимая во внимание значительную неопределенность прогнозов».

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список русскоязычной литературы

Албригтон Д.Л., Баркер Т., Башмаков И.А. и др. Изменение климата. 2001 г. Обобщенный доклад МГЭИК / Под ред. Р.Т. Уотсона. Geneva: World Meteorological Organization, IPCC Secretariat, 2003. 220 с.

Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Географические закономерности продуктивности и круговорота химических элементов в основных типах растительности Земли // Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. Л.: Наука, 1969. С. 24–33.

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: Ин-т космических исследований РАН, 2016. 208 с.

Власова Е.В. Физическая география материков. Часть первая. Евразия, Северная Америка. М.: Просвещение, 1986. 275 с.

Герасимов И.П. Генетические, географические и исторические проблемы современного почвоведения. М.: Наука, 1976. 298 с.

Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. Растительность Европейской части СССР / Под ред. С.А. Грибовой и др. Л.: Наука, 1980. 429 с.

Карта растительности Европейской части СССР / Науч. ред. Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1974. 6 л.

Коломыц Э.Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. М.: КМК, 2018. 716 с.

Морозов Г.Ф. Учение о лесе. Изд. третье. Л.: Гос. изд-во, 1926. 368 с.

Мохов И.И. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке в сопоставлении с климатическими изменениями в прошлом и настоящем // Возможности предотвращения изменений климата и его последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука, 2006. С. 75–93.

Приказ Минприроды РФ от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 29.07.2022 № 69451).

Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.

Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Кн. 1 / под ред. А.С. Исаева. М.: КМК, 2012. 460 с.

Растительность Европейской части СССР и Кавказа. Масштаб 1:2 000 000 / отв. ред. Т.В. Котова. М.: ГУГК, 1987. 4 л.

Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит, 2005. 231 с.

Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995, № 5. С. 3–20.

Хелберт С.Х. Мнимые повторности и планирование экологических полевых экспериментов // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений) / Под ред. Г.С. Розенберга и Д.Б. Гелашвили. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. С. 61–65.

Швиденко А.З. Глобальные изменения и российская лесная таксация // Лесная таксация и лесостроительство. 2012. Т. 47, № 1. С. 52–75.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Краксер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 3–25.

Общий список литературы / Reference List

Albritton D.L., Barker T., Bashmakov I.A. et al. Climate change. 2001. IPCC summary report / Ed. R.T. Watson. Geneva: WMO, IPCC Secretariat, 2003. 220 p. (in Russ.).

Bazilevich N.I., Rodin L.E. Geographical patterns of productivity and turnover of chemical elements in the main types of vegetation on Earth // General theoretical problems of biological productivity. Leningrad: Nauka, 1969. P. 24–33. (in Russ.).

Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow: Space Research Institute RAS, 2016. 208 p. (in Russ.).

Vlasova E.V. Physical geography of the continents. Part 1. Eurasia, North America. Moscow: Education, 1986. 275 p. (in Russ.).

Gerasimov I.P. Genetic, geographical and historical problems of modern soil science. Moscow: Nauka, 1976. 298 p. (in Russ.).

Gribova S.A., Isachenko T.I., Lavrenko E.M. Vegetation of the European part of the USSR / Eds. S.A. Gribova et al. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russ.).

Vegetation map of the European part of the USSR / Sci. eds. T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko. Scale 1:2,500,000. Moscow: MDGC, 1974. 6 sh. (in Russ.).

Kolomyts E.G. Experimental geographical ecology. The Records of Geographer-Naturalist. Moscow: KMK, 2018. 716 p. (in Russ.).

Morozov G.F. The doctrine of the forest. 3rd ed. Leningrad: State P.H., 1926. 368 p. (in Russ.).

Mokhov I.I. Model assessments of possible climate changes in the 21st century in comparison with climate changes in the past and present // Possibilities of preventing climate change and its consequences. The problem of the Kyoto Protocol. Moscow: Nauka, 2006. P. 75–93. (in Russ.).

Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated May 27, 2022 No. 371 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas absorption" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on July 29, 2022 No. 69451). (in Russ.).

Puzachenko Yu.G., Skulkin V.S. Vegetation structure of the forest zone of the USSR. Systems analysis. Moscow: Nauka, 1981. 275 p. (in Russ.).

Diversity and dynamics of forest ecosystems of Russia. Book 1 / ed. A.S. Isaev. Moscow: KMK, 2012. 460 p. (in Russ.).

Vegetation of the European part of the USSR and the Caucasus. Scale 1:2,000,000 / ed. T.V. Kotova. Moscow: MDGC, 1987. 4 sh. (in Russ.).

Tarko A.M. Anthropogenic changes of the global biosphere processes. Mathematical modelling. Moscow: Fizmatlit, 2005. 232 p. (in Russ.).

Utkin A.I. Carbon cycle and forestry // Forestry. 1995, No. 5. P. 3–20. (in Russ.).

Helbert S.H. Imaginary replicates and planning of ecological field experiments // Problems of an ecological experiment (planning and analysis of observations) / Eds. G.S. Rosenberg, D.B. Gelashvili. Tolyatti: IEVB RAS, 2008. P. 9–45. (In Russ.).

Shvidenko A.Z. Global change and Russian forest mensuration // Forest inventory and forest planning. 2012. Vol. 47, No. 1. P. 52–75. (in Russ.).

Shvidenko A.Z., Schepachenko D.G., Kraxner F., Onuchin A.A. Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological backgrounds // Sib. J. For. Sci. 2017. No. 6. P. 3–25. (in Russ.).

Alcamo J., Van den Born G.J., Bouwman A.F. et al. Modeling the global society-biosphere climate system / Part 2: Computed scenarios // Water Air Soil Pollut. 1994. Vol. 76. P. 37–78.

Gamon J.A., Huemmrich K.F., Peddle D.R. et al. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89, Iss. 2. P. 139–162.

Gorshkov V.G. Physical and biological basis of life stability. Man, Biota, Environment. New York: Springer Verlag, 1994. 470 p.

Hansen J., Fung I., Lacis A. et al. Global climate changes as forecasted by Goddard Institute for Space studies three-dimensional models // J. Geophys. Res. 1988. Vol. 93. P. 9341–9364.

Hansen J., Sato M., Ruedy R. et al. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // Climate dynamics. 2007. Vol. 29, No. 7–8. P. 661–696.

Houghton J.T., MeiraFilho L.G., Callander B.A., eds. Climate Change 1995. The Science of Climatic Change. Cambridge, UK: The Cambridge Univ. Press, 1996. 572 p.

Kolomyts E.G. Zonal ecosystems of Volga river basin under global warming: prognostic and paleogeographical scenarios // Am. J. Environ. Prot. 2013. Vol. 2, Iss. 1. P. 10–36.

Le Quere C., Moriarty R., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2014 // Earth Syst. Sci. data. 2015. Vol. 7, Iss. 1. P. 47–85.

Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to linear regression analysis. New York: Wiley, 1982. 300 p.

Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec., 2015. 19 p.

Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model – Had-CM3 // Climate Dynamics. 2000. Vol. 16, No. 2. P. 123–146.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107, No. 1–2. P. 1–32.

Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E. et al. An inventory-based of Canada's managed forest carbon dynamics. 1900 to 2008 // Global Change Biol. 2011. Vol. 17, No. 6. P. 2227–2244.

RESOURCE POTENTIAL OF THE VOLGA RIVER BASIN FORESTS IN MITIGATION OF GLOBAL WARMING (towards the Paris Agreement on Climate Change)

© 2025 E.G. Kolomyts

Institute of Fundamental Problems of Biology, Pushchino Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Pushchino, Russia

Abstract: The known conceptual provisions on the ecological resources of the forest cover as its ability to additionally absorb greenhouse gases using mechanisms of regulation of the carbon cycle under climate change are empirically substantiated. Using the example of the Volga basin, a regional experiment was carried out on the numerical solution of a dual problem set by the Paris (2015) Agreement on Climate Change: to calculate the absorption of CO₂ from the atmosphere by forest communities under current global warming, taking into account their adaptation to climate change, and thereby assess the regulation of the carbon cycle by forests, which should contribute to the mitigation of warming. The materials of large-scale landscape surveys previously conducted by the author in the Middle and Upper Volga region were used. The index of elastic-plastic stability of forest ecosystems is proposed as an adaptation indicator. Multiple regression methods are used to reveal spatial variability of forest carbon balance in connection with changes in their adaptive potential and with the climate predicted for 2100 according to the global HadCM3 model, which is adequate to the current unprecedentedly high growth of global warming. The adsorption potential of native and derivative boreal and nemoral forests is established, their ability to mitigate climate change, including reducing anthropogenic warming, is assessed. A picture of a significant increase in the adsorption capacity of boreal and nemoral forests with an increase in their elastic-plastic stability is obtained. A quantitative assessment of the loss of environmental resources by forests of the Volga river basin since the beginning of intensive forest and land use is carried out. Contrasting changes in the environmental resources of boreal and nemoral forests in the process of global warming are revealed. The expected structural changes in boreal and nemoral forests in this process should not significantly change their adsorption potential. For the initial period of global warming (1990–2009), the verification of predictive models of the carbon balance of the Volga basin for boreal forests of Central Canada was carried out. Numerical assessment of the influence of elastic stability of forest formations and predicted climatic conditions on the carbon balance of forests was carried out using multiple regression methods.

Keywords: forest ecosystems, global warming, absorption and emission of greenhouse gases, climatogenic stability of forests, forest ecological resources, predictive empirical-statistical modeling