

УДК 630\*162.5+547.45(470)

## ЗАВИСИМОСТЬ ЗАПАСОВ ДРЕВЕСИНЫ В ЛЕСАХ РОССИИ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ<sup>1</sup>

© 2019 г. В. И. Грабовский<sup>a, \*</sup>, Д. Г. Замолдчиков<sup>a, b</sup><sup>a</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117810 Россия<sup>b</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет,  
Ленинские горы, 1, стр. 12, Москва, 119992 Россия

\*E-mail: wgrabo@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

После доработки 07.10.2018 г.

Принята к публикации 03.12.2018 г.

Проведена оценка зависимостей средних запасов древесины в различных породно-возрастных группах лесов согласно данным Государственного лесного реестра (ГЛР) по состоянию на 01.02.2013 г. с климатическими параметрами, усредненными за 1981–2000 г., посредством регрессионного анализа. Анализ проводили по группам пород: все породы, хвойные, твердолиственные, мягколиственные, прочие, в дифференциации по группам возраста: все группы возраста, молодняки, средневозрастные и приспевающие, спелые и перестойные. Всего было получено 20 сочетаний групп пород и групп возраста, для каждой из которых проведен корреляционный и регрессионный анализ. В качестве независимых переменных использованы среднегодовая температура, разность среднемесячных температур июля и января и годовое количество осадков. Средние запасы положительно коррелируют со среднегодовыми температурами и влажностью и отрицательно – с величиной разности между средними температурами июля и января. Отчетливый тренд возрастания величины коэффициента корреляции средних запасов и среднегодовой температуры наблюдается в ряду групп пород прочие – хвойные–твердолиственные–мягколиственные. Для всех сочетаний групп пород и групп возраста получены уравнения множественной полиномиальной регрессии, включающие все возможные сочетания независимых переменных и их квадратичных эффектов. Самые высокие коэффициенты детерминации ( $R^2 > 0.7$ ) обнаруживаются у всех лесов, у твердолиственных пород, а также спелых и средневозрастных лесов всех пород и твердолиственных пород. Наименее предсказуемыми ( $R^2 < 0.5$ ) оказались леса прочих пород, а также молодняки всех групп пород. По найденным уравнениям регрессии можно прогнозировать изменения средних запасов как лесов в целом, так и по отдельным группам возраста и пород на фоне изменений климата.

*Ключевые слова:* государственный лесной реестр, запасы древесины, климатические характеристики, статистический анализ.

DOI: 10.1134/S0024114819020025

Одно из наиболее востребованных направлений современной экологии – прогноз реакции биоты на текущие изменения климата (Walther et al., 2002; Johnson et al., 2011). Поскольку биосфера является активным участником разворачивающихся климатических событий, оценка перспектив ее изменений под воздействием меняющегося климата необходима для разработки эффективных методов сохранения климатической системы (Harper et al., 2018). Одним из важнейших комплексов экосистем в этом аспекте яв-

ляются леса. Прогноз возможных сдвигов продуктивности лесных экосистем в связи с климатическими изменениями требует оценки количественных связей между продуктивностью лесов и климатом. Для получения таких оценок традиционно применяются два подхода: эмпирический (феноменологический, индуктивный) и эколого-физиологический (функциональный, механистический, дедуктивный). Эмпирический подход основан на анализе экспериментальной либо полевой информации для выявления закономерностей между независимыми (климатическими) и зависимыми (прирост, запас древесины, чистая первичная продукция, фитомасса) переменными. Применительно к продуктивности лесов этот подход развивается с середины XX в., ко-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ 16-17-00123 “Научные основы учета и прогноза бюджета угле рода лесов России в системе международных обязательств по охране атмосферы и климата”.

гда были предложены климатические индексы (комбинации таких параметров, как температуры и осадки за те или иные интервалы года, продолжительности периодов с положительными температурами и так далее), имеющие высокие корреляции с приростом лесов по запасу (Weck, 1955; Paterson, 1956; и др.). Детальные описания различных климатических индексов и иных эмпирических форм связи продуктивности лесов с климатическими характеристиками приведено в сводках (Уткин, 1975; Усольцев, 2003, 2016).

Экофизиологический подход базируется на использовании теоретических представлений из области экофизиологии и более общих физических законов (например, закона сохранения энергии). Как правило, он реализуется в форме сложных математических моделей. По отношению к продуктивности лесов экофизиологический подход активно применяется с конца 1970-х годов (Dixon et al., 1978; Caldwell et al., 1986; Rauscher et al., 1990; и др.). Дальнейшее развитие обоих направлений привело к формированию так называемых гибридных моделей, комбинирующих механистические и эмпирические зависимости. Таковой, например, является популярная модель 3-PG, (Landsberg, Waring, 1997; Landsberg et al., 2003), активно используемая и в настоящее время (Meyer et al., 2017; Xie et al., 2017).

Отметим общую тенденцию в применении описанных выше подходов. В начале их развития исследователи в основном интересовали вопросы связи продуктивности и роста лесов с пространственными вариациями текущего климата. С начала 1990-х годов все большее внимание уделяется проблемам, связанным с прогнозированием воздействия климатических изменений на лесные экосистемы. Таким образом, центр внимания сместился с описательного на прогнозный аспект эмпирических уравнений и механистических моделей. В этой связи, конечно же, встает вопрос об адекватности исходных наборов, определяющих эмпирические зависимости или калибрующих механистические модели, тем сочетаниям климатических факторов, которые могут иметь место при изменениях климата. Вполне очевидно, что чем более объем исходный массив данных, тем более надежными должны быть прогнозы.

В России существует огромный фактический материал по лесам, полученный в ходе лесоустроительных работ и обобщенный в базах данных Государственного лесного реестра (ГЛР). Главное и неоспоримое преимущество ГЛР перед другими источниками сведений о лесах — это его объем, распространяющийся на все леса России, произрастающие на землях лесного фонда. Однако использование данных ГЛР требует учета их специфики, которая определяется прежде всего тем,

что этот информационный источник был сформирован для нужд лесного хозяйства. Данные ГЛР представлены по административным образованиям (лесничествам, субъектам Российской Федерации) в дифференциации по доминирующим древесным породам и их возрастным группам (молодняки 1 и 2 классов возраста, средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные). Временные интервалы возрастных групп устанавливаются в зависимости от возраста рубки и могут заметно отличаться даже для насаждений одной и той же доминирующей породы в пределах одного административного образования.

ГЛР активно используется для получения содержательных результатов по различным экологическим аспектам функционирования лесов. В частности, на основе данных ГЛР были выполнены оценки углеродного бюджета лесов России, в том числе используемые для отчетности в рамках РКК ООН (Замолотчиков и др., 2011, 2013, 2017), площади листовой поверхности (Грабовский и др., 2015; Корзухин, Грабовский, 2018), продуктивности лесных охотничьих угодий для питания лося (Шабров, 2014) и др.

Цель настоящей работы состоит в эмпирической оценке связей средних запасов древесины в различных породно-возрастных группах лесов с климатическими параметрами посредством регрессионного анализа. Нахождение таких регрессионных уравнений позволит экстраполировать изменение продуктивности лесов как на локальном, так и на глобальном уровне в связи с имеющимися климатическими сценариями ИРСС (Изменение ..., 2013). При этом полученные прогнозы будут полностью совместимы с существующими форматами представления информации в ГЛР, что может облегчить использование прогнозов в деятельности управления лесами, в том числе связанной с адаптацией к изменениям климата.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве “базового” климатического периода в настоящей работе выступает интервал с 1981 по 2000 гг. Поля климатических параметров были получены усреднением результатов расчетов по ансамблю 31 модели СМIP5. Описание проекта СМIP (Coupled Model Intercomparison Project) содержится в работе (Taylor et al., 2012). Детали применения ансамбля СМIP5 для характеристики климатических изменений на территории России приведены в докладе (Второй ..., 2014). Исходные данные были распределены по узлам сетки с шагом в 1°. С использованием метода “сплайн” в ArcGIS были получены карты распределения среднегодовых температур и годового количества осадков. На основе полученных карт методом “зональной статистики” найдены усредненные для субъектов Российской Федерации климати-

Таблица 1. Корреляции средних запасов и климатических факторов для лесов Российской Федерации

Группа пород	Группа возраста	<i>tas</i>		<i>pre</i>		<i>DIF</i>	
		<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
<i>All</i>	<i>All</i>	0.460	$1.53 \times 10^{-5}$	0.609	$1.67 \times 10^{-9}$	-0.532	$3.20 \times 10^{-7}$
<i>All</i>	<i>YNG</i>	0.526	$4.70 \times 10^{-7}$	0.536	$2.47 \times 10^{-7}$	-0.528	$4.19 \times 10^{-7}$
<i>All</i>	<i>MDA</i>	0.467	$1.10 \times 10^{-5}$	0.527	$4.30 \times 10^{-7}$	-0.486	$4.33 \times 10^{-6}$
<i>All</i>	<i>ADL</i>	0.433	$5.34 \times 10^{-5}$	0.673	$6.14 \times 10^{-12}$	-0.498	$2.25 \times 10^{-6}$
<i>Cnf</i>	<i>All</i>	0.446	$3.77 \times 10^{-5}$	0.580	$2.15 \times 10^{-8}$	-0.451	$3.09 \times 10^{-5}$
<i>Cnf</i>	<i>YNG</i>	0.470	$1.25 \times 10^{-5}$	0.354	$1.35 \times 10^{-3}$	-0.324	$3.54 \times 10^{-3}$
<i>Cnf</i>	<i>MDA</i>	0.483	$6.46 \times 10^{-6}$	0.425	$9.62 \times 10^{-5}$	-0.365	$9.33 \times 10^{-4}$
<i>Cnf</i>	<i>ADL</i>	0.700	$5.40 \times 10^{-12}$	0.560	$2.64 \times 10^{-7}$	-0.518	$2.68 \times 10^{-6}$
<i>Bro</i>	<i>All</i>	0.437	$3.08 \times 10^{-4}$	0.613	$7.20 \times 10^{-8}$	-0.715	$3.28 \times 10^{-11}$
<i>Bro</i>	<i>YNG</i>	0.334	$1.10 \times 10^{-2}$	0.500	$7.60 \times 10^{-5}$	-0.569	$3.92 \times 10^{-6}$
<i>Bro</i>	<i>MDA</i>	0.453	$1.90 \times 10^{-4}$	0.543	$4.22 \times 10^{-6}$	-0.672	$1.68 \times 10^{-9}$
<i>Bro</i>	<i>ADL</i>	0.329	$1.04 \times 10^{-2}$	0.546	$6.54 \times 10^{-6}$	-0.663	$7.86 \times 10^{-9}$
<i>Sof</i>	<i>All</i>	0.455	$2.00 \times 10^{-5}$	0.492	$3.09 \times 10^{-6}$	-0.424	$7.86 \times 10^{-5}$
<i>Sof</i>	<i>YNG</i>	0.431	$7.45 \times 10^{-5}$	0.345	$1.83 \times 10^{-3}$	-0.309	$5.54 \times 10^{-3}$
<i>Sof</i>	<i>MDA</i>	0.481	$5.48 \times 10^{-6}$	0.447	$2.82 \times 10^{-5}$	-0.389	$3.35 \times 10^{-4}$
<i>Sof</i>	<i>ADL</i>	0.324	$3.16 \times 10^{-3}$	0.468	$1.06 \times 10^{-5}$	-0.296	$7.20 \times 10^{-3}$
<i>Oth</i>	<i>All</i>	0.319	$1.07 \times 10^{-2}$	0.498	$3.32 \times 10^{-5}$	-0.374	$2.56 \times 10^{-3}$
<i>Oth</i>	<i>YNG</i>	0.401	0.004768	0.523	0.000139	-0.433	0.002134
<i>Oth</i>	<i>MDA</i>	0.367	0.007485	0.457	0.000662	-0.35	0.011043
<i>Oth</i>	<i>ADL</i>	0.185	$1.56 \times 10^{-1}$	0.492	$6.59 \times 10^{-5}$	-0.313	$1.49 \times 10^{-2}$

Примечание. В табл. 1 и 2 группы пород: *All* – все породы, *Cnf* – хвойные, *Bro* – твердолиственные, *Sof* – мягколиственные, *Oth* – прочие; группы возраста: *All* – все возраста, *YNG* – молодняки, *MDA* – средневозрастные, *ADL* – спелые; *tas* – среднегодовая температура, *pre* – годовое количество осадков, *DIF* – разница между среднеиюльской и среднеянварской температурами, *R* – коэффициент корреляции, *P* – значимость.

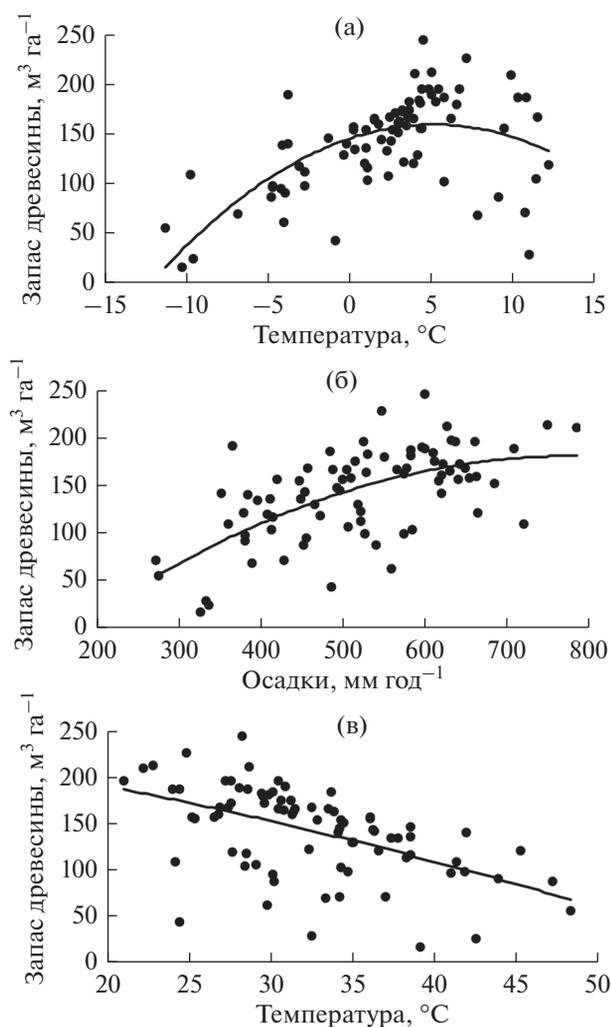
ческие характеристики. На основе информации базы данных ГЛР по состоянию на 01.01.2013 г. рассчитаны средние запасы в агрегированных группах лесных насаждений по каждому из субъектов Российской Федерации. Агрегацию данных производили по группам пород: все породы, хвойные, твердолиственные, мягколиственные, прочие, в дифференциации по группам возраста: “все группы возраста”, “молодняки” (молодняки первой и второй групп возраста), “средневозрастные” (средневозрастные и приспевающие) и “спелые” (спелые и перестойные). Всего было получено  $5 \times 4 = 20$  сочетаний групп пород и групп возраста, для каждой из которых проведен корреляционный и регрессионный анализ с использованием пакета “car” в среде R.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве независимых переменных в предлагаемом анализе рассмотрены показатели температуры (среднегодовая температура воздуха *tas*, разность среднемесячных температур июля и января *DIF*) и годовое количество осадков *pre*

(мм год<sup>-1</sup>). Анализ корреляций между климатическими переменными и средними запасами древесины показал, что как для лесов в целом, так и для отдельных породных и возрастных эти корреляции обладают высокой достоверностью (табл. 1). Исключение составляет группа спелых насаждений прочих пород, средний запас которых недостоверно коррелирует со среднегодовой температурой ( $P > 0.05$ ).

Таблица 1 показывает, что средний запас положительно коррелирует со среднегодовыми температурами и влажностью и отрицательно – с величиной разности между средними температурами июля и января. В разных группах возраста величина корреляции средних запасов со среднегодовыми температурами несколько убывает в ряду от молодых к средневозрастным и спелым лесам. При этом корреляция с разницей между среднеиюльскими и среднеянварскими температурами изменяется недостоверно в интервале от -0.6 до -0.5. С режимом осадков наиболее тесно коррелирована возрастная группа спелых. В группах пород наиболее тесные корреляции с климатическими факторами можно видеть у твердо-



**Рис. 1.** Зависимость средних запасов лесов субъектов Российской Федерации от среднегодовой температуры (а), среднегодовой влажности (б) и разности между средними температурами июля и января (в).

лиственных и хвойных. При этом особо тесно связаны средние запасы твердолиственных с размахом вариации среднегодовых температур. Отчетливый тренд возрастания величины коэффициента корреляции средних запасов и среднегодовой температуры наблюдается в ряду групп пород прочие – хвойные–твердолиственные–мягколиственные.

Корреляции между климатическими параметрами и средними запасами для агрегаций по породно-возрастному составу (3 группы возраста × 4 группы пород = 12 агрегаций) приведены в табл. 1. Отчетливые тренды для групп возраста здесь можно отметить только для хвойных пород: с возрастом увеличивается связь средних запасов со всеми климатическими показателями.

Правило экологического оптимума предполагает, что существуют оптимальные для роста ле-

сов величины климатических факторов, отклонения от оптимума в обе стороны ухудшают рост. Иными словами, на всем диапазоне связь между климатическими переменными и ростом растений не может быть линейной. Действительно, как видно на рис. 1, линии тренда, которые отражают характер связи, куполообразны. Поэтому в расчет уравнений регрессии добавим квадратичные функции переменных:  $tas^2$ ,  $pre^2$  и  $DIF^2$ . Таким образом, с учетом взаимодействий между переменными, получим полное уравнение множественной полиномиальной регрессии, включающее все возможные сочетания параметров и квадратичные члены:

$$\begin{aligned}
 V = & b_0 + b_1 \times tas + b_2 \times pre + b_3 \times DIF + b_4 \times tas^2 + \\
 & + b_5 \times pre^2 + b_6 \times DIF^2 + \\
 & + b_7 \times tas \times pre + \\
 & + b_8 \times tas \times DIF + b_9 \times pre \times DIF + \\
 & + b_{10} \times tas \times pre \times DIF,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V$  – средний запас древесины,  $m^3 \text{ га}^{-1}$ ;  $tas$  – среднегодовая температура,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $pre$  – годовое количество осадков,  $\text{мм год}^{-1}$ ;  $DIF$  – разница между среднеиюльской и среднеянварской температурами,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $b_0, b_1 \dots b_{10}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Наша задача найти такие величины свободного члена ( $b_0$ ) и коэффициентов уравнения регрессии ( $b_i$ ), чтобы при минимуме оставшихся членов уравнения регрессии (1) (ненулевых  $b_i$ ) получить максимально возможную точность предсказаний (максимальную величину коэффициента детерминации). Для этого рассмотрим все возможные подмножества регрессионных моделей и выберем соответствующий задаче вариант. Поскольку при увеличении числа независимых переменных коэффициент детерминации всегда увеличивается, для оценки пригодности модели будем использовать скорректированный коэффициент детерминации, учитывающий это обстоятельство (Кабаков, 2014). Этим требованиям удовлетворяет функция `regsubsets` пакета `leaps` в R, которая рассчитывает величину скорректированного коэффициента детерминации при всех возможных сочетаниях и наборах независимых переменных. Выбор итогового набора переменных осуществляется по простому правилу. При близких коэффициентах детерминации предпочтение отдается уравнению с меньшим числом переменных. По результатам тестирования всех сочетаний независимых параметров коэффициенты уравнения (1), дающие максимально возможный коэффициент детерминации, представлены в табл. 2.

Самые высокие коэффициенты детерминации ( $R^2 > 0.7$ ) обнаруживаются у всех лесов (*All-All*), у твердолиственных пород (*Bro*), а также у спелых

Таблица 2. Параметры  $b_0$ – $b_{10}$  уравнений регрессии (1) для лесов Российской Федерации

Группа пород	Группа возраста	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$R^2$
All	All	891	49.7	-2.63	-	-1.74	0.00107	-0.341	0.0320	-1.72	0.0412	-	0.725
All	YNG	63.6	-	-	-	-0.415	-0.000248	-0.0478	0.0231	-0.209	0.00608	-	0.671
All	MDA	969	52.6	-2.81	-	-2.01	0.000993	-0.382	0.0381	-1.84	0.0465	-	0.702
All	ADL	-511	48.4	-	40.7	-1.65	-	-0.592	0.0274	-1.55	-	-	0.759
Cnf	All	877	-23.5	-2.71	-	-1.56	0.00127	-0.284	0.143	-	0.0378	-0.00234	0.613
Cnf	YNG	120	-	-	-	-0.917	-0.000702	-0.268	0.0967	0.457	0.0282	-0.00342	0.704
Cnf	MDA	-366	-	-0.0506	29.0	-0.555	-	-0.423	0.0320	-0.278	0.00170	-	0.565
Cnf	ADL	-10.5	-26.9	-	-	0.158	-	-	0.0566	0.670	0.00151	-0.00138	0.478
Bro	All	-147	-	-	11.1	-0.374	-	-0.146	-	-0.277	-	0.000923	0.451
Bro	YNG	581	-	-1.27	-	-2.16	-	-0.215	0.0882	-0.842	0.0299	-	0.59
Bro	MDA	53.8	-95.2	-	4.01	-	-	-	0.148	1.95	-	-0.00160	0.669
Bro	ADL	418	-	-0.589	-11.0	-0.537	-	-	0.0377	-	0.0171	-0.000932	0.447
Sof	All	107	22.3	-	-	-1.27	-0.000707	-0.251	0.0785	-	0.0277	-0.00312	0.652
Sof	YNG	820	-40.4	-2.35	-	-1.86	-	-0.660	0.256	1.98	0.0747	-0.00871	0.712
Sof	MDA	-21.6	-	0.200	-	-0.0669	-0.000204	-	-	-0.109	-	0.000329	0.352
Sof	ADL	-233	-	0.281	15.2	-0.444	-0.000273	-0.201	-	-0.411	-	0.00137	0.574
Oth	All	-781	44.0	0.202	51.3	-1.06	-0.000141	-0.723	-	-1.46	-	0.000765	0.552
Oth	YNG	-25.6	-	-	-	-	-	-	0.0129	-0.109	0.00205	-	0.494
Oth	MDA	26.6	-	-	-	-0.215	-	-	0.0254	-	-	-0.000631	0.302
Oth	ADL	19.2	-39.5	-	-	-	-	-	0.103	1.07	-	-0.00288	0.525

Примечание. Обозначения см. в табл. 1. Проверки означают, что включение данной независимой переменной не увеличивает точность регрессионного описания.

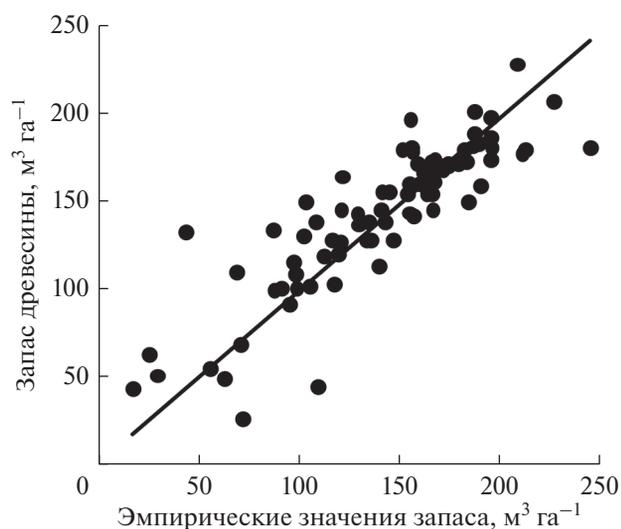


Рис. 2. Эмпирические и модельные значения средних запасов лесов субъектов Российской Федерации.

(*All-ADL*) и средневозрастных лесов всех пород (*All-MDA*) и спелых лесов твердолиственных пород (*Bro-ADL*). Наименее предсказуемыми ( $R^2 < 0.5$ ) оказались леса прочих пород (*Oth-All*), а также молодняки всех групп пород (*Cnf-YNG*, *Sof-YNG*, *Bro-YNG*, *Oth-YNG*).

Для иллюстрации эффективности модели сравним эмпирические значения средних запасов всех лесов в разрезе субъектов Российской Федерации и предсказанные значения по уравнению регрессии (1) с соответствующими коэффициентами (табл. 2, строка *All-All*) и данными по климату. В идеальном случае все точки должны располагаться на диагонали графика. Как видно на рис. 2, точки концентрируются возле диагонали, т.е. соответствие натуральных и модельных данных приемлемо. Отдельные выбросы относятся к регионам, либо занимающим несколько климатических областей, как, например, Красноярский край, либо малооблесенным, как Тульская и Мурманская области, где возможность ошибки возрастает из-за малых выборок. Таким образом, в целом предсказательная сила полученного уравнения регрессии вполне удовлетворительна.

Содержательная часть результатов — найденные коэффициенты регрессионных уравнений, описывающих влияние климата на средние запасы древесины в лесах России — позволяет экстраполировать изменения ключевого свойства насаждений (средних запасов) в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями. Причем делать это возможно для территории России как для лесов в целом, так и для каждой рассмотренной породной и возрастной группы в отдельности. Доля объясненной вариации при этом позво-

ляет утверждать, что точность прогнозов является удовлетворительной.

Выбор параметров, характеризующих климат, проведен на основе следующих соображений. Поиску связи между климатом и продуктивностью лесов посвящено много исследований, пик которых пришелся на вторую половину прошлого века (см. обзоры (Уткин, 1975; Усольцев, 2003)). Были найдены индексы и уравнения, связывающие различные аспекты климата и продуктивности лесов (Weck, 1955; Paterson, 1956). Не вдаваясь в анализ преимуществ и недостатков каждого из подходов, отметим два важных для нас момента. Первый состоит в том, что во всех индексах так или иначе применялись данные по средним величинам температур и влажности, а также показатели варибельности температур в виде либо амплитуды изменений температуры за интервал времени, либо различных индексов континентальности климата (Санников и др., 2012, Усольцев и др., 2015). Второй момент связан с тем, что использование более специальных характеристик климата (температуры за определенный период, дневные амплитуды температур, число дней в году, средняя температура которых превышает некоторую пороговую, и т.д.) повышало локальную (в географическом смысле) точность прогнозов, но давало значительные ошибки в применении к другим регионам (Luyssaert et al., 2007). Как известно, климатические параметры коррелированы друг с другом. Из матрицы корреляций климатических параметров видно, что среднегодовая температура положительно связана с годовым количеством осадков и оба этих параметра отрицательно — с размахом годовых колебаний среднемесячных температур. Поскольку климатические параметры скоррелированы, то имеет смысл использовать для анализа лишь самые общие характеристики климата. Кроме того, мы выбрали легкодоступные из климатических сводок параметры климата, которые не требуют специальной обработки и дополнительной информации. Эти же климатические характеристики представлены в прогнозных климатических сценариях IPCC, и их легко использовать в расчетах.

Ведущим аргументом в пользу полинома второй степени как формы уравнения регрессии послужили результаты предварительного анализа возможных вариантов уравнений и выбор из них простейшего, дающего удовлетворительный коэффициент детерминации. Здесь применялись как тесты, специально разработанные для подобных задач, так и арбитражные соображения баланса точности предсказаний и лаконичности формулы. Вторым аргументом является общеизвестное правило оптимума, согласно которому в градиенте факторов внешней среды есть оптимальный уровень значений, занижение или превышение которого приводит к снижению уро-

жайности. Иными словами, зависимость свойства от фактора имеет форму колокола, которая хорошо описывается полиномом второй степени.

**Заключение.** С использованием полученных уравнений регрессии можно предсказать возможные изменения средних запасов лесов как в целом, так и по отдельным группам возраста и пород вследствие возможных изменений климата (среднегодовых температур, годового количества осадков и разности среднеиюльскими и среднеянварскими температурами). Эти данные необходимы для коррекции таблиц хода роста при прогнозных расчетах лесной динамики в климатических сценариях. Однако полученные результаты будут корректны лишь тогда, когда скорость адаптации лесов к изменениям климата будет не ниже скорости климатических изменений. Иными словами, предлагаемые уравнения адекватны для предсказаний лишь в том случае, если леса в прогнозный период успевают адаптироваться к происходящим климатическим изменениям. В реальности ситуация может быть иной. Скорость изменений климата может быть столь высокой, что леса могут не успевать приспосабливаться к новым условиям. В этом случае могут возникать различные патологические состояния. Например, снижение устойчивости деревьев к различным заболеваниям может приводить к угнетению роста или даже массовому усыханию и гибели лесов. Оценка скоростей адаптации лесного покрова к изменениям климата – отдельная задача, решению которой уделяется большое внимание в экологической литературе (Замолодчиков, Краев, 2016).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

Грабовский В.И., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. Оценка индекса листовой поверхности для территории России по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2015. № 4. С. 255–259.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Куриц В.А. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 73–92.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Современное сокращение стока углерода в леса России // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 6. С. 719–721.

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

Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков / Под ред. Т.Ф. Стокера и др., Кембридж: Кембридж Университи Пресс, 2013. 28 с.

Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R. М.: ДМК Пресс, 2014. 588 с.

Корзухин М.Д., Грабовский В.И. Оценка индекса листовой поверхности лесных ландшафтов России по данным государственного лесного реестра // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: в 5 т. М.: Изд-во ФГБНУ “ВНИИ агрохимии”, 2018. Том 3. С 65–70.

Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. Очерки по теории лесной популяционной биологии. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2012. 273 с.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2003. 407 с.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Уральский гос. лесотех. университет, 2016. 384 с.

Усольцев В.А., Субботин К.С., Кох Е.В., Богословская О.А. Биологическая продуктивность сосновых лесов Евразии: исследование системных связей, обеспечивающих эффективность принятия решений в лесном секторе средствами IT-технологий. Екатеринбург: Уральский гос. лесотех. университет, 2015. 157 с.

Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Итоги науки и техники. Лесоведение и лесоводство. М.: ВИНТИ, 1975. Т. 1. С. 9–189.

Шабров Ф.А. Об использовании данных государственного лесного реестра при оценке продуктивности лесных охотничьих угодий для питания лося (*Alces alces* L.) // Вестник Костромского гос. университета им. Н.А. Некрасова. 2014. № 7. С. 79–81.

Caldwell M.M., Meister H.-P., Tenhunen J.D., Lange O.L. Canopy structure, light microclimate and leaf gas exchange of *Quercus coccifera* L. in a Portuguese macchia: measurements in different canopy layers and simulations with a canopy model // Trees. 1986. V. 1 (1). P. 25–41.

Dixon K. R., Luxmoore R.J., Begovich C.L. CERES – A model of forest stand biomass dynamics for predicting trace contaminant, nutrient, and water effects. I. Model description // Ecological Modelling. 1978. V. 5. P. 17–38.

Harper A.B., Powell T., Cox P.M., House J., Huntingford C., Lenton T.M., Sitch S., Burke E., Chadburn S.E., Collins W.J., Comyn-Platt E., Daioglou V., Doelman J.C., Hayman G., Robertson E., van Vuuren D., Wiltshire A., Webber C.P., Bastos A., Boysen L., Ciais P., Devaraju N., Jain A.K., Krause A., Poulter B., Shu S. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets // Nature communications. 2018. V. 9. Article number 2938. P. 1–13.

Johnson K.G., Brooks S.J., Fenberg P.B., Glover A.G., James K.E., Lister A.M., Michel E., Spencer M., Todd J.A., Valsami-Jones E., Young J.R., Stewart J.R. Climate change and biosphere response: unlocking the collections vault // BioScience. 2011. V. 61. P 147–153.

Landsberg J.J., Waring R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use effi-

- ciency, carbon balance and partitioning // *Forest Ecology and Management*. 1997. V. 95. P. 209–228.
- Landsberg J.J., Waring R.H., Coops N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types // *Forest Ecology and Management*. 2003. V. 172. P. 199–214.
- Luysaert S., Inglima I., Jung M., Richardson A.D., Reichstein M., Papale D., Piao S.L., Schulze E.D., Wingate L., Matteucci G., Aragao L.E.O.C., Aubinet M., Beers C., Bernhofer C., Black G.K., Bonal D., Bonnefond J.M., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K.S., Dolman A.J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T., Grünwald T., Guidolotti G., Hanson P.J., Harding R., Hollinger D.Y., Hutryra L.R., Kolari P., Kruijt B., Kutsch W.L., Lagergren F., Laurila T., Law B., Le Maire G., Lindroth A., Loustau D., Malhi Y., Mateu J., Migliavacca M., Misson L., Montagnani L., Moncrieff J., Moors E.J., Munger J.W., Nikinmaa E., Ollinger S.V., Pita G., Rebmann C., Rouspard O. CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 2509–2537. (doi 10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x).
- Meyer G., Black T.A., Jassal R.S., Nesic Z., Grant N.J., Spittlehouse D.L., Fredeen A.L., Christen A., Coops N.C., Foord V.N., Bowler R. Measurements and simulations using the 3-PG model of the water balance and water use efficiency of a lodgepole pine stand following mountain pine beetle attack // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 393. P. 89–104.
- Paterson S.S. The forest area of the world and its potential productivity. Göteborg: The Royal University, 1956. 216 p.
- Rauscher H.M., Isebrands J.G., Host G.E., Dickson R.E., Dickmann D.I., Crow T.R., Michael D.A. ECOPHYS: An ecophysiological growth process model for juvenile poplar // *Tree Physiology*. 1990. V. 7. P. 255–281.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012. V. 93. P. 485–498.
- Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J.M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change // *Nature*. 2002. V. 416. P. 389–395.
- Weck J. Forstliche Zuwachs- und Ertragskunde. Radebeul und Berlin: Neumann Verlag, 1955. 160 c.
- Xie Y., Wang H., Lei X. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 406. P. 208–218.

## Mean Timber Storages Depends on Climate Variables in Russian Forests

V. I. Grabovskii<sup>1,\*</sup> and D. G. Zamolodchikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences  
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117810, Russia

<sup>2</sup>Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University  
Leninskie Gory 1 bldg. 12, Moscow, 119992, Russia

\*E-mail: wgrab@mail.ru

Received 1 October 2018

Revised 7 October 2018

Accepted 3 December 2018

Mean timber storages across different species and age groups of forests based on the State Forest Inventory 2013 data were correlated by means of regression analysis to climatic variables, averaged over 1981–2000. The following species categories were predefined: all species, conifers, hardwoods, softwoods, and others. The following age groups were predefined: all ages, young growth, middle-aged, pre-mature, mature, and old-growth forests. Finally, the correlation and regression analyses were undertaken for each of the 20 age and species groups of forests. Mean annual temperature, difference of mean July and mean January temperatures, and annual precipitation were independent variables. Mean timber storages positively correlate to the mean annual temperature and humidity, and negatively correlate with the difference of mean July and mean January temperature. Coefficient of correlation between the mean storages and the mean annual temperature had pronounced growing trend across the species groups, as follows by value: other species, conifers, hardwoods, softwoods. Multiple polynomial regression equations were found for every species and age group. They had all possible linear and squared couplings between independent variables. Coefficients of determination had the highest values ( $R^2 > 0.7$ ) for all forests combined, for hardwood species, and also for mature and middle-aged forests of all species combined and hardwood species. Other forest species and all young-growth forests were the least predictable ( $R^2 < 0.5$ ). The regression equations could be used to forecast changes in the mean storages of timber under changing climate for all forests combined and forests of different age and specie composition.

**Keywords:** the State Forest Inventories, forest storages, climate parameters, statistical analysis.

**Acknowledgements:** This study was supported financially by the Russian Science Foundation (project no. 16-17-00123 “Scientific basis of accounting and forecast of forest carbon budget of Russia in the framework of International responsibilities in protection of atmosphere and climate”).

## REFERENCES

- Caldwell M.M., Meister H.P., Tenhunen J.D., Lange O.L., Canopy structure, light microclimate and leaf gas exchange of *Quercus coccifera* L. in a Portuguese macchia: measurements in different canopy layers and simulations with a canopy model, *Trees*, 1986, Vol. 1, No. 1, pp. 25–41.
- Dixon K.R., Luxmoore R.J., Begovich C.L., CERES – A model of forest stand biomass dynamics for predicting trace contaminant, nutrient, and water effects. I. Model description, *Ecological Modelling*, 1978, Vol. 5, No. 1, pp. 17–38.
- Grabovskii V.I., Zukert N.V., Korzukhin M.D., Otsenka indeksa listovoi poverkhnosti dlya territorii Rossii po dannym gosudarstvennogo lesnogo reestra (Leaf area index estimate for the Russian territory based on the State forest inventory), *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 255–259.
- Harper A.B., Powell T., Cox P.M., House J., Huntingford C., Lenton T.M., Sitch S., Burke E., Chadburn S.E., Collins W.J., Comyn-Platt E., Daioglou V., Doelman J.C., Hayman G., Robertson E., Van Vuuren D., Wiltshire A., Webber C.P., Bastos A., Boysen L., Ciais P., Devaraju N., Jain A.K., Krause A., Poulter B., Shu S., Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets, *Nature Communications*, 2018, Vol. 9, No. 1, Article 2938.
- IPCC, 2013: Summary for policymakers, In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge – New York: Cambridge University Press, 2013, pp. 29.
- Johnson K.G., Brooks S.J., Fenberg P.B., Glover A.G., James K.E., Lister A.M., Michel E., Spencer M., Todd J.A., Valsami-Jones E., Young J.R., Stewart J.R., Climate change and biosphere response: Unlocking the collections vault, *BioScience*, 2011, Vol. 61, No. 2, pp. 147–153.
- Kabacoff R.I., R in action: *Data analysis and graphics with R*, Moscow: DMK, 2014, 579 p.
- Korzukhin M.D., Grabovskii V.I., Otsenka indeksa listovoi poverkhnosti lesnykh landshaftov Rossii po dannym gosudarstvennogo lesnogo reestra (Leaf area index estimate for the Russian forested landscapes based on the State Forest Inventory data ), In: *Novye metody i rezul'taty issledovaniia landshaftov v Evrope, Tsentral'noi Azii i Sibiri. Monitoring i modelirovanie landshafta (Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia. Monitoring and modeling of landscape)*: Izd-vo VNII agrokhimii, 2018, Vol. 3, pp. 65–70 (346 p.).
- Landsberg J.J., Waring R.H., A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning, *Forest Ecology and Management*, 1997, Vol. 95, No. 3, pp. 209–228.
- Landsberg J.J., Waring R.H., Coops N.C., Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types, *Forest Ecology and Management*, 2003, Vol. 172, No. 2, pp. 199–214.
- Luyssaert S., Inghima I., Jung M., Richardson A.D., Reichstein M., Papale D., Piao S.L., Schulze E.-D., Wingate L., Matteucci G., Aragao L., Aubinet M., Beer C., Bernhofer C., Black K.G., Bonal D., Bonnefond J.M., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K.J., Dolman A.J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T., Grünwald T., Guidolotti G., Hanson P.J., Harding R., Hollinger D.Y., Hutyrá L.R., Kolari P., Kruijt B., Kutsch W., Lagergren F., Laurila T., Law B.E., Le Maire G., Lindroth A., Loustau D., Malhi Y., Mateus J., Migliavacca M., Misson L., Montagnani L., Moncrieff J., Moors E., Munger J.W., Niinmaa E., Ollinger S.V., Pita G., Rebmann C., Rouspard O., Saigusa N., Sanz M.J., Seufert G., Sierra C., Smith M.L., Tang J., Valentini R., Vesala T., Janssens I.A., CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database, *Global Change Biology*, 2007, Vol. 13, No. 12, pp. 2509–2537.
- Meyer G., Black T.A., Jassal R.S., Nesic Z., Grant N.J., Spittlehouse D.L., Fredeen A.L., Christen A., Coops N.C., Foord V.N., Bowler R., Measurements and simulations using the 3-PG model of the water balance and water use efficiency of a lodgepole pine stand following mountain pine beetle attack, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 393, pp. 89–104.
- Paterson S.S., *The forest area of the world and its potential productivity*, Göteborg: The Royal University, 1956, 216 p.
- Rauscher H.M., Isebrands J.G., Host G.E., Dickson R.E., Dickmann D.I., Crow T.R., Michael D.A., ECOPHYS: An ecophysiological growth process model for juvenile poplar, *Tree Physiology*, 1990, Vol. 7, No. 1–2–3–4, pp. 255–281.
- Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V., *Ocherki po teorii lesnoi populyatsionnoi biologii* (Outlines of theory of forest populational biology), Yekaterinburg: Izd-vo BS UrO RAN, 2012, 272 p.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, Vol. 93, No. 4, pp. 485–498.
- Usol'tsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii (k menedzhmentu biosfernykh funktsii lesov)* (Biological productivity of forest-forming species in Eurasia's climatic gradients (as related to supporting decision-making processes in forest management)), Yekaterinburg: Izd-vo UGLTU, 2016, 383 p.
- Usol'tsev V.A., *Fitomassa lesov Severnoi Evrazii: predel'naya produktivnost' i geografiya* (Forest biomass of northern Eurasia: the limits of productivity and their geography), Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2003, 406 p.
- Usol'tsev V.A., Subbotin K.S., Kokh E.V., Bogoslovskaya O.A., *Biologicheskaya produktivnost' sosnovykh lesov Evrazii: issledovanie sistemnykh svyazei, obespechivayushchikh effektivnost' prinyatiya reshenii v lesnom sektore sredstvami IT–tekhnologii* (Bioproductivity of pine forests in Eurasia: An IT study of system linkages supporting effective decision-making in forest sector), Yekaterinburg: Izd-vo UGLTU, 2015, 157 p.
- Utkin A.I., *Biologicheskaya produktivnost' lesov (metody izucheniya i rezul'taty)* (Bioproductivity in forests: methods and results of study), Moscow: Izd-vo VINITI, 1975, 190 p.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii, (Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p.
- Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebe T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F., Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 2002, Vol. 416, No. 6879, pp. 389–395.
- Xie Y., Wang H., Lei X., Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern

- China, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 406, pp. 208–218.
- Zamolodchikov D., Kraev G., Vliyanie izmenenii klimata na lesa Rossii: zafiksirovannyye vozdeistviya i prognoznyye otsenki (Effects of climate changes on forests of Russia: Records and forecasts), *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2016, No. 4 (48), pp. 23–31.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N., A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 706–715.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V., Recent decrease in carbon sink to Russian forests, *Doklady Biological Sciences*, 2017, Vol. 476, No. 1, pp. 200–202.
- Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Gitarskii M.L., Byudzhet ugleroda upravlyaemykh lesov Rossiiskoi Federatsii (Carbon budget of the managed forests of the Russian Federation), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 23–34.
- Shabrov F.A., Ob ispol'zovanii dannykh gosudarstvennogo lesnogo reestra pri otsenke produktivnosti lesnykh okhotnich'ikh ugodii dlya pitaniya losya (*Alces alces* L.) (On using data of state forest inventory while assessing productivity of forest hunting ground lands for nutrition of elk (*Alces alces* L.)), *Vestnik Kostromskogo gos. universiteta im. N.A. Nekrasova*, 2014, Vol. 20, No. 7, pp. 79–81.