

География чистой первичной продукции древостоев рода *Larix* в пределах Евразии

В.А. Усольцев, д.с.-х.н., профессор, **Д.С. Гаврилин**, аспирант, Уральский ГЛТУ; **А.И. Колтунова**, д.с.-х.н., профессор, **А.В. Борников**, к.с.-х.н., Оренбургский ГАУ

В связи с возрастающей биосферной функцией лесов необходима информация об их биологической продуктивности в географическом аспекте. Распределение растений на земной поверхности является следствием двух определяющих факторов: биологические свойства растений, а в пределах одного вида — влияние на него физико-географических условий, из которых важнейшими являются климатические [1]. Лиственничные леса растут в Северном полушарии, в основном в России, из зарубежных стран — в Канаде и небольшими участками в Китае и странах Западной Европы. Основные массивы лиственницы сосредоточены в Сибири, составляя 42% всех российских лесов по занимаемой площади и 50% по запасу фитомассы [2].

Сегодня Евразия представлена данными о годичной продукции и фитомассе лиственничников, распределённых по фракциям (ствол, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы) в количестве 116 пробных площадей в возрастном диапазоне от 10 до 380 лет и в условиях произрастания, характеризующихся от Ia до Vb классами бонитета. Методическими указаниями МБП рекомендовалась закладка пробных площадей в типичных фоновых местообитаниях, репрезентативных по отношению к данному типу сообществ [3]. Если считать упомянутые пробные площади репрезентативными, то можно сделать предварительный анализ географических закономерностей биопроductивности лиственничников. Настоящая статья посвящена анализу структуры годичной чистой первичной продукции (ЧПП) лиственницы в разных природных зонах.

Объект и методы исследования. Исследования проведены в Тургайском прогибе в чистых 40–41-летних культурах лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) на территории Боровского лесхоза Кустанайской области (Северный Казахстан, 53° с.ш., 64° в.д.) в условиях сухой степи (годовые осадки 250 мм), где заложено 10 пробных площадей и взято по ступеням толщины 28 модельных деревьев. Для географического анализа фитомассы и годичной продукции нами привлечены материалы базы данных В.А. Усольцева [4] в количестве 100 пробных площадей и 6 пробных площадей по лиственнице Гмелина в Якутии в возрасте от 10 до 174 лет, заложённых японскими исследователями [2] (табл. 1).

Лиственница имеет специфические биологические особенности по сравнению с другими породами, что потребовало внесения некоторых поправок

в ранее применявшуюся методику фракционирования фитомассы кроны [5]. У лиственницы хвоей покрыта вся ветвь, причём периферия ветви и её остальная (приствольная) часть охвоены в разной степени, поэтому хвоя у них определялась отдельно. Более детально методика определения фитомассы разных фракций модельных деревьев лиственницы описана ранее [6]. Результаты определения фитомассы и годичной чистой первичной продукции (ЧПП) лиственницы на 10 пробных площадях приведены в таблице 2.

Результаты исследований. В лесной экологии многие явления характеризуются лишь на описательном уровне, что создаёт проблему при оценке географических закономерностей распределения полученных на пробных площадях данных о биологической продуктивности лесных деревьев и насаждений. Чтобы гармонизировать или согласовать между собой регрессионные модели биологической продуктивности насаждений разных экорегионов, их объединяют в некую систему, например с помощью блоковых фиктивных переменных [7]. Эта система даёт возможность оценить степень дистанцирования показателей фитомассы деревьев по различным экорегионам.

Для оценки региональных смещений в показателях биологической продуктивности лиственницы применена регрессионная модель, структура которой получила обоснование в нашей предыдущей работе [8]:

$$\ln M = a_0 + a_1 \ln A + a_2 X_1 + \dots + a_8 X_{10} \rightarrow \begin{cases} \ln Pi = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln M + a_3 X_1 + \dots + a_9 X_{10}; \\ \ln Zi = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln M + a_3 X_1 + \dots + a_9 X_{10}, \end{cases} \quad (1)$$

где M — запас древостоя, м³/га;

Pi — масса i -й фракции древостоев (Ps , Pb , Pf — соответственно стволов, ветвей, хвои), кг;

A — возраст, лет;

Zi — годичная ЧПП древостоев (Zs , Zb , Zf — соответственно стволов, ветвей, хвои), кг;

$X_1 - X_{10}$ — блоковые фиктивные переменные [7].

Посредством названных переменных выполнена кодировка принадлежности локальных массивов данных о фитомассе и годичной продукции лиственничников по схеме, представленной в таблице 3. В данном случае структура блоковых фиктивных переменных построена так, что выполняется упомянутое дистанцирование регионов относительно Тургайского прогиба, где были заложены наши пробные площади.

В результате обработки фактических данных пробных площадей согласно структуре уравнений (1) получена их количественная характеристика (табл. 4).

1. Распределение по регионам и количество пробных площадей, заложенных в лиственничниках Евразии и привлечённых для географического анализа их ЧПП

Регион	Вид лиственницы	Систематическое название	Происхождение	Высота над уровнем моря, м	Северная широта	Восточная долгота	Число пробных площадей
Тургайский прогиб, Аман-Карагайский бор, сухая степь	сибирская	<i>L. sibirica</i> Ldb.	культуры	100–120	52°20'	64°00'	10
Центральная Европа, Южные Альпы и Западные Карпаты	европейская	<i>L. decidua</i> Mill.	естественное	470–1700	44°00' – 49°19'	07°00' – 16°40'	2
Европейская территория РФ, от средней тайги до лесостепи	Сукачёва	<i>L. sukaczewii</i> N. Dyl.	культуры	50–100	53°30' – 60°30'	30°00' – 50°20'	6
Западная Сибирь, лесотундра в низовьях р. Пур	сибирская	<i>L. sibirica</i> Ldb.	естественное	25–30	67°00'	78°00'	3
Западная Сибирь, средняя тайга	сибирская	<i>L. sibirica</i> Ldb.	естественное	25–30	64°00'	78°00'	3
Средняя Сибирь, лесотундра и северная тайга	Гмелина	<i>L. Gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.	естественное	60–220	63°00' – 68°00'	90°00' – 129°00'	16
Средняя Сибирь, красноярская лесостепь	сибирская	<i>L. sibirica</i> Ldb.	культуры	25–30	56°13'	92°19'	1
Северо-Западный Китай, Синьцзян-Уйгурский район, Алтай	сибирская	<i>L. sibirica</i> Ldb.	естественное	1650–2298	43°00' – 48°00'	81°00' – 93°00'	11
Северо-Восточный Китай, Внутренняя Монголия, Большой Хинган и др.	Гмелина	<i>L. Gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.	естественное	650–1280	42°20' – 52°44'	120°00' – 128°16'	49
Центральный Китай, провинции Шаньси, Сычуань и др.	принца Рупрехта	<i>L. Principis-ruprechtii</i> Mayr	естественное	1850–4240	28°35' – 37°50'	99°10' – 113°35'	12
Япония, гора Асибегу, вулкан Ивате	японская	<i>L. leptolepis</i> Gord.	культуры	300–360	39°45' – 43°13'	141°08' – 142°23'	3
Итого							116

2. Фактические данные фитомассы и годичной ЧПП в культурах лиственницы сибирской Тургайского прогиба (обозначения см. в тексте), т/га

А, лет	N, шт/га	M, м³/га	Фитомасса древостоев				Годичная ЧПП, т/га			
			стволы	ветви	хвоя	всего	стволы	ветви	хвоя	всего
41	1516	498	209,9	17,62	4,28	260,6	2,38	1,90	4,28	8,92
41	811	275	109,2	15,11	3,39	146,2	1,57	1,00	3,39	6,19
40	1600	410	168,6	15,19	6,42	217,1	1,85	1,22	6,42	9,79
40	1633	326	135,5	21,53	7,67	187,2	1,83	1,45	8,08	11,65
40	1825	398	167,3	15,40	3,53	210,5	1,99	1,70	3,53	7,51
40	1200	297	116,7	14,33	4,00	155,6	1,66	1,01	4,00	6,92
40	2350	391	180,1	15,63	6,57	232,2	2,03	1,34	6,57	10,28
40	1750	343	142,6	22,25	7,90	196,5	1,92	1,51	8,36	12,09
40	1950	468	228,9	22,20	6,26	289,8	2,68	1,58	6,26	10,91
40	1475	365	143,4	17,66	4,94	191,2	2,05	1,25	4,94	8,54

Густота древостоев в уравнении (1) для запаса древостоев оказалась статистически не значимой на уровне P_{95} ($t_{\text{факт}} = 1,6 < t_{05} = 2,0$) и была исключена из дальнейших расчётов.

Количественную характеристику региональных различий биологической продуктивности лиственничников даёт таблица 5, полученная путём последовательного табулирования (последовательность показана стрелкой) уравнений (1) по задаваемым значениям возраста, равного 40

годам, запаса древостоя и блоковых фиктивных переменных (табл. 1).

Предыдущими исследованиями ЧПП лиственничников Северной Евразии на материалах 17 пробных площадей была установлена статистически значимая обратная связь общей и надземной ЧПП с индексом континентальности, по С.П. Хромову [9]. Обратная связь фитомассы 30-летних лиственничников с географической широтой (47, 50, 52 и 62°, соответственно южная, средняя, северная

3. Схема кодирования массивов данных блоковыми фиктивными переменными

№ региона	Регион и древесный вид	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
1	Тургайский прогиб (лиственница сибирская)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Центральная Европа (лиственница европейская)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Европейская территория РФ (лиственница Сукачёва)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Западная Сибирь, лесотундра (лиственница сибирская)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	Западная Сибирь, средняя тайга (лиственница сибирская)	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6	Средняя Сибирь, северная тайга (лиственница Гмелина)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	Средняя Сибирь, красноярская лесостепь (лиственница сибирская)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	Северо-Западный Китай (лиственница сибирская)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	Северо-Восточный Китай (лиственница Гмелина)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	Центральный Китай (лиственница принца Рупрехта)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	Япония (лиственница японская)										

4. Характеристика уравнений (1) для запаса (M), фитомассы (P_i) и годичной ЧПП (Z_i) древостоев

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные							
	a_0	a_1X_1	a_2X_2	a_3X_3	a_4X_4	a_5X_5	a_6X_6	a_7X_7
Запас древостоев M								
$\ln M$	3,9450	-1,1374	-0,5453	-2,9128	-1,0594	-3,0442	-0,8509	-0,7221
	a_8X_8	a_9X_9	$a_{10}X_{10}$	$a_{11}\ln(A)$	$a_{12}\ln(M)$		R^2	SE
$\ln M$	-1,1885	-0,9087	-0,3180	0,5337	—		0,741	0,40
Фитомасса древостоев P_i								
	a_0	a_1X_1	a_2X_2	a_3X_3	a_4X_4	a_5X_5	a_6X_6	a_7X_7
$\ln(P_s)$	-0,7237	0,1295	0,1458	0,1341	0,2140	0,2666	0,0980	0,0804
$\ln(P_b)$	-2,1315	0,7431	0,4838	0,4736	0,0741	0,6052	-0,0165	0,3883
$\ln(P_f)$	-2,6748	0,0888	0,1290	0,2506	-0,4610	0,6645	-0,0165	0,6636
	a_8X_8	a_9X_9	$a_{10}X_{10}$	$a_{11}\ln(A)$	$a_{12}\ln(M)$	R^2		SE
$\ln(P_s)$	0,1728	0,0294	-0,0590	-0,0571	1,0117	0,963		0,15
$\ln(P_b)$	0,2114	0,1175	0,2267	-0,1844	0,9587	0,831		0,31
$\ln(P_f)$	0,4226	0,0836	0,2485	-0,2139	0,8662	0,807		0,31
Годичный прирост фитомассы древостоев Z_i^*								
	a_0	a_1X_1	a_2X_2	a_3X_3	a_4X_4	a_5X_5	a_6X_6	a_7X_7
$\ln(Z_s)$	-1,1508	0,8817	1,0961	0,8895	1,5250	1,3128	1,1303	0,6444
$\ln(Z_b)$	-0,2136	1,7692	0,4660	-0,3508	0,4710	-1,1067	-0,2060	-1,5664
$\ln(Z_f)$	-2,6612	0,1160	0,1304	0,3770	-0,3748	0,0853	-0,0147	0,5987
	a_8X_8	a_9X_9	$a_{10}X_{10}$	$a_{11}\ln(A)$	$a_{12}\ln(M)$	R^2		SE
$\ln(Z_s)$	1,4055	1,7644	1,2378	-0,9519	0,9036	0,883		0,35
$\ln(Z_b)$	-0,7832	-0,5227	0,9346	-0,4846	0,3918	0,891		0,34
$\ln(Z_f)$	0,4498	0,0923	0,2249	-0,2753	0,9041	0,850		0,30

* Примечание: В некоторых регионах лиственница произрастает совместно с другими породами, и в таких случаях $Z_f \neq P_f$

5. Расчётные показатели фитомассы и годичной продукции 40-летних лиственничников в разных экорегионах (обозначения в тексте)

№ региона	M	Фитомасса, т/га				Годичная продукция, т/га			
		P_s	P_b	P_f	Итого	Z_s	Z_b	Z_f	Итого
1	370	156	17,4	5,31	178,5	1,98	1,37	5,31	8,66
2	119	56	12,3	2,13	70,55	1,71	5,15	2,13	8,99
3	215	104	16,8	3,70	124,3	3,62	1,76	3,70	9,08
4	20	9,4	1,71	0,56	11,62	0,35	0,31	0,56	1,21
5	128	66	6,80	1,40	74,27	3,49	1,45	1,40	6,34
6	18	9,4	1,72	0,37	11,44	0,47	0,14	0,37	0,98
7	158	73	7,58	2,12	82,36	2,84	0,80	2,12	5,76
8	180	81	12,9	5,03	99,20	1,96	0,22	5,03	7,21
9	113	56	6,89	2,84	65,37	2,76	0,39	2,84	5,99
10	149	64	8,20	2,56	74,74	5,08	0,57	2,56	8,21
11	269	106	16,1	4,99	127,6	5,12	3,08	4,99	13,2

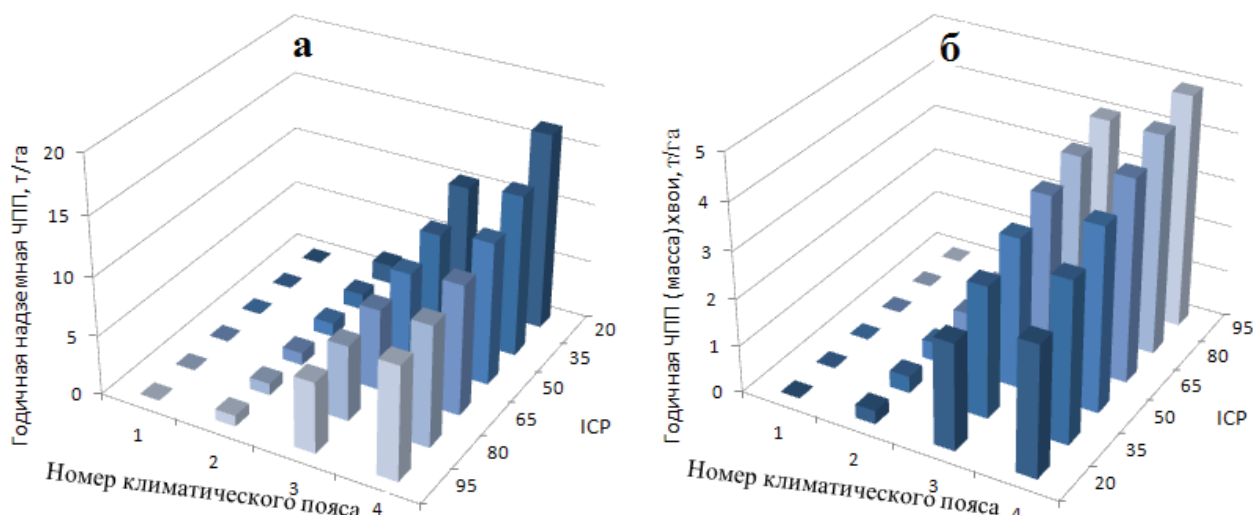


Рис. – Зависимость годичной надземной ЧПП (а) и годичной ЧПП хвои в лиственничниках Евразии от индекса континентальности климата и зонального (климатического) пояса

части Большого Хингана и Центральная Сибирь) была показана в совместной работе китайских и японских исследователей [10], согласно которой в диапазоне широт от 47 до 62° фитомасса снижается в 3,4 раза.

С учётом сказанного значения надземной годичной ЧПП (как суммы ЧПП стволов, ветвей и хвои) и годичной продукции хвои (табл. 5) мы соотнесли с четырьмя соответствующими климатическими (зональными) поясами (субарктический, северный умеренный, южный умеренный и субтропический), закодированными порядковыми номерами 1, 2, 3 и 4 [11], а также с индексами континентальности территории Евразии для января, по Л.Г. Полозовой [12], путём нанесения координат каждой пробной площади на соответствующие карты-схемы. С помощью регрессионного анализа получены уравнения:

$$\ln(Zt) = -4,8822 + 12,2472 (\ln Zon) - 4,2757 (\ln Zon)^2 - 0,3554 (\ln ICP); R^2 = 0,969, \quad (2)$$

$$\ln(Zf) = -10,6994 + 16,4174 (\ln Zon) - 6,3231 (\ln Zon)^2 + 0,3716 (\ln ICP); R^2 = 0,969, \quad (3)$$

где Zt – годичная надземная ЧПП, т/га;
 Zf – годичная ЧПП (масса) хвои, т/га;
 Zon – номер зонального пояса: 1, 2, 3 и 4, соответственно субарктический, северный умеренный, южный умеренный и субтропический;
 ICP – индекс континентальности климата, %.
 Геометрическая интерпретация уравнений (2) и (3) представлена на рисунке.

Выводы. 1. Как по годичной ЧПП, так и по фитомассе лиственничники Евразии имеют существенные региональные различия, которые в значительной степени определяются особенностями климата.

2. Годичная ЧПП лиственницы, как всей надземной, так и хвои, многократно возрастает в на-

правлении от субарктического зонального пояса к субтропическому.

3. В пределах одного зонального пояса надземная ЧПП снижается в направлении от Атлантического и Тихоокеанского побережий к полюсу континентальности в Якутии, а ЧПП хвои в том же направлении увеличивается. Таким образом, продуктивность функционирования хвои, как отношение надземной ЧПП к продукции хвои, увеличивается по мере ужесточения условий произрастания и достигает наибольших значений в районе многолетней мерзлоты.

Литература

1. Сукачев В.Н. Дендрология с основами лесной геоботаники. 2-е изд. Л.: Рослестехиздат, 1938. 576 с.
2. Kajimoto T., Osawa A., Usoltsev V.A., Abaimov A.P. Biomass and productivity of Siberian larch forest ecosystems // A. Osawa et al. (eds.). Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. P. 99–122 (Ecological Studies. Vol. 209) (DOI: 10.1007/978-1-4020-9693-8).
3. Программа-минимум по определению первичной биологической продуктивности наземных растительных сообществ (проект) // Растительные ресурсы. 1967. Т. 3. Вып. 4. С. 612–620.
4. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.
5. Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с.
6. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и её приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
8. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 708 с.
9. Usoltsev V.A., Koltunova A.I., Kajimoto T., Osawa A., Koike T. Geographical gradients of annual biomass production from larch forests in Northern Eurasia // Eurasian Journal of Forest Research. 2002. Vol. 5. P. 55–62.
10. Shi F., Sasa K., Koike T. Characteristics of larch forests in Daxingan mountains, Northeast China // A. Osawa et al. (eds.). Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. P. 367–383 (Ecological Studies. Vol. 209) (DOI: 10.1007/978-1-4020-9693-8).
11. Усольцев В.А. География удельной первичной продукции фитомассы лесов и неопределённости её оценки и интерпретации // Эко-Потенциал. 2014. № 1 (5). С. 117–143.
12. Полозова Л.Г. О характеристике континентальности климата // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86. № 5. С. 412–422.