

УДК 630

## ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЛИСТВЕННИЦЫ В ЭКОТОНЕ ЛЕСОТУНДРЫ

© 2004 г. В. И. Харук, С. Т. Им, К. Дж. Рэнсон, М. М. Наурзбаев

Представлено академиком Е.А. Вагановым 25.03.2004 г.

Поступило 25.02.2004 г.

Климатические сценарии предсказывают изменения температуры и осадков в бореальной зоне [1], что может повлечь продвижение границы леса на север. Реакция древесных растений на изменения климата наиболее вероятна в экотоне лесотундры, где температура лимитирует рост. В ряде публикаций установлено проникновение древесной растительности в тундру как на северной, так и на высотной границах леса, а также возрастание сомкнутости притундровых лесов и увеличение радиального прироста деревьев в последние десятилетия [2-7]. Отслеживание влияния изменений климата на динамику растительности в циркулярной зоне возможно на основе временных рядов космоснимков, позволяющих как обнаруживать изменения растительного покрова, так и экстраполировать данные наземных наблюдений на региональный и субглобальный уровни [5, 8, 9].

Цель работы - анализ динамики границы леса и сомкнутости древостоев в экотоне лесотундры на основе временных рядов космосъемок за последние 30 лет. Исследуемая территория (~36 тыс. га) включала самый северный в мире лесной массив Ары-Мас и расположенные к юго-востоку от него древостои. Древесная растительность представлена лиственницей (*Larix gmelinii*). Климат региона резко континентальный, количество осадков < 260 мм. Материалы дистанционного зондирования включали: 1) снимки Landsat-MSS (L-MSS; 26.07.1973 г; пиксел  $57 \times 57$  м) и Landsat-7 (L-7; 3.08.2000 г., пиксел  $30 \times 30$  м), 2) панхроматический космоснимок системы "Согона" (28.02.1965 г, пиксел  $7 \times 7$  м.), 3) панхроматические аэроснимки (31.07.1970 г., М 1 : 35000; 27.07.1984 г., М 1 : 15000). Наиболее ранние наземные материалы относятся к 1969 г. и представлены картой урочища Ары-Мас с описанием 12 пробных площадей [10]. Повторные обследования выполнялись в 1989-1991 и 2000 гг. Данные по температуре и

осадкам были получены на метеостанции "Хатанга", находящейся на расстоянии ~45 км от объекта исследования. Оценка влияния эколого-климатических факторов выполнялась по индексам ширины годовых колец (ИШГК). За величину тренда радиального прироста ( $\gamma$ ) принималось значение тангенса угла между абсциссой и линией регрессии ИШГК.

Поскольку в определении "границы леса" в экотоне лесотундры имеется неопределенность [3], в данной работе лесные территории классифицировались по величине сомкнутости крон (СК): 1)  $СК < 0.1$  (редины,  $L_1$ ), 2)  $0.1 < СК < 0.3$  (редколесья,  $L_2$ ) и 3)  $СК \geq 0.3$  (древостои,  $L_3$ ). К "фону" были отнесены тундры, болота, кустарники. Снимки Landsat были приведены к единому пространственному разрешению ( $60 \times 60$  м) и дешифрировались по обучающим выборкам методом максимального правдоподобия. По снимку "Согона" оценено положение границы лес-тундра, поскольку древесные растения выделяются на фоне снега по контрастной тени, чему способствуют низкие зенитные углы Солнца. Для отсечения территорий ниже ( $h < 5$  м над у.м.) и выше ( $h > 80$  м) пределов произрастания лиственницы применялась матрица высот. Результаты дешифрирования (картосхемы, соответствующие 1973 и 2000 гг.) представлены на рис. 1. Точность классификации оценивалась на основе матрицы ошибок и каппа ( $\kappa$ )-статистики; для снимка L-MSS она составила 60% ( $\kappa = 0.47$ ), снимка L-7 - 66% ( $\kappa = 0.49$ ), что соответствует удовлетворительному уровню точности.

Анализ динамики площадей  $L_1-L_3$  (рис. 1) показал, что наиболее значимые изменения произошли в классе "древостои" ( $СК \geq 0.3$ ), площадь которого увеличилась на 66% (табл. 1). Переходы между кассами  $L_1-L_3$  представлены в табл. 2. Наблюдается переход редины и редколесий в более сомкнутые насаждения; при этом класс "фон" переходит преимущественно в редины. Заметная часть территории бывшего "фона" (1973 г) перешла в классы  $L_2$  и  $L_3$ . Источником древесной растительности в таких переходах могла служить стланиковая форма лиственницы.

**Таблица 1.** Временная динамика классов растительности в массиве Ары-Мас за период 1973-2000 гг.

Классы	$S$ , га (1973 г.)	$S$ , га (2000 г.)	$\Delta S$ , %
Редины ( $L_1$ )	17883	19264	+8%
Редколесья ( $L_2$ )	13887	16133	+16%
Древостои ( $L_3$ )	9415	15601	+66%
Фон	51654	41842	-19%

Примечание.  $S$  - площадь, га.

Орографические характеристики осваиваемых лиственницей территорий приведены на рис. 2. Все категории лиственничников ( $L_1$ - $L_3$ ) продвигались по градиенту высоты (максимально - лиственничные редины). При этом наиболее сомкнутые древостои ( $L_2$ ,  $L_3$ ) занимали наиболее крутые склоны (максимум распределения  $12^\circ$ - $13^\circ$ ), тогда как максимум распределения редины приходится на  $\sim 6^\circ$  (рис. 2а), что отображает защитную роль складок рельефа. Влияние рельефа наиболее значимо в зимний период, поскольку ветер и метелевый перенос снега вызывают обезвоживание и повреждение побегов. Наблюдается азимутальная неоднородность продвижения лиственницы в тундру: преобладающее направление - северное (рис. 2б).

Средняя скорость ( $v$ ) продвижения леса в тундру оценивалась следующим образом.

1. По возрастанию площадей классов  $L_1$ - $L_3$  за период 1973-2000 гг. С наибольшей скоростью (2.4% в год) прирастали площади древостоев ( $L_3$ ). Минимальное значение скорости соответствовало рединам (0.3%/год), промежуточное - редколесьям (0.6%).

2. По продвижению границ площадей классов  $L_1$ - $L_3$  площади каждого класса аппроксимировались (А) кругами и (Б) прямоугольниками. В приближении (А) вычислялась разность радиусов кругов, соответствующих площадям 2000 и 1973 гг.

Получены следующие оценки:  $v_1 = 11$ ,  $v_2 = 19$  и  $v_3 = 58$  м/год (для классов  $L_1$ ,  $L_2$ , и  $L_3$  соответственно). В приближении (Б) принималось, что одна из сторон прямоугольника ориентирована по направлению продвижения лиственницы, а вторая соответствовала протяженности экотона лес-тундра, аппроксимированной прямой линией (что близко к реальности, поскольку температурный градиент вдоль склонов сформировал сравнительно однородную границу леса). Получены следующие значения  $v$ :  $v_1 = 3$ ,  $v_2 = 9$ ,  $v_3 = 11$  м/год. Приближение (А) дает максимальную, (Б) - минимальную оценки средней скорости продвижения границы леса за период 1973-2000 гг. Во всех случаях скорость возрастает с увеличением сомкнутости насаждений, что отображает переход менее сомкнутых насаждений ( $L_1$ ,  $L_2$ ) в более сомкнутые ( $L_2$ ,  $L_3$ ). Поскольку фронт продвижения в тундру сформирован лиственничными редколесьями ( $L_1$ ), скорость именно этого класса (3-11 м/год) следует принять в качестве оценки скорости проникновения лиственницы в тундру.

Установлена отрицательная корреляция между  $g$  (трендами радиального прироста древостоев) и сомкнутостью крон ( $\alpha = -0.52$ , тау-параметр Кендалла,  $\tau = -0.48$ ) и положительная - с глубиной оттаивания почвогрунтов ( $\alpha = 0.63$ ,  $\tau = 0.46$ ;  $\# > 0.95$ ). Полученные данные согласуются с эффектом перехода редины и редколесий в древостой. Глубина оттаивания увеличивается с высотой над у.м. ( $\alpha = 0.55$ ,  $\tau = 0.51$ ), что связано с уменьшением сомкнутости мохово-лишайникового покрова ( $\alpha = -0.83$ ,  $\tau = -0.66$ ) и его высоты ( $\alpha = -0.88$ ,  $\tau = -0.75$ ).

Погодичная вариабельность радиального прироста положительно коррелирует со среднемесячными летними температурами ( $\alpha = 0.65$ ,  $\tau = 0.39$ ), и отрицательно - с летними ( $\alpha = -0.51$ ,  $\tau = -0.41$ ) и зимними ( $\alpha = -0.70$ ,  $\tau = -0.48$ ) осадками, что объясняется, во-первых, уменьшением продолжительности солнечного сияния и, во-вторых, смещением даты схода снежного покрова: накопление дополнительного количества снега задерживает весеннюю фенофазу [11].

**Таблица 2.** Динамика переходов между классами растительности в массиве Ары-Мас за период 1973-2000 гг. (в процентах от 2000 г.)

	Классы	2000 г.			
		Древостои	Редколесья	Редины	Фон
1973 г.	Древостои ( $L_3$ )	40.4	11.5	2.1	2.0
	Редколесья ( $L_2$ )	17.2	34.4	12.5	7.7
	Редины ( $L_1$ )	5.4	16.5	29.1	20.9
	Фон	36.9	37.6	56.3	69.3

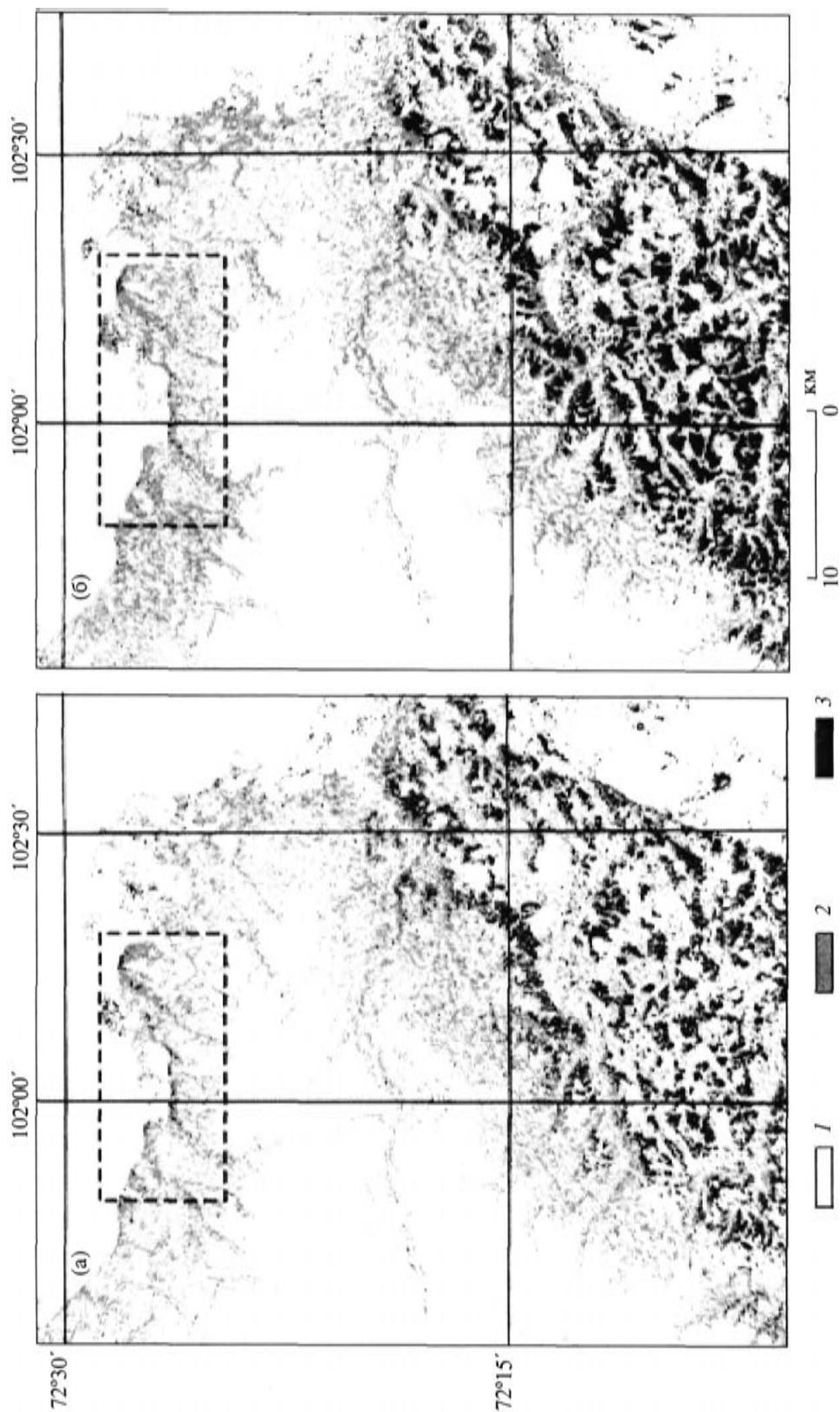
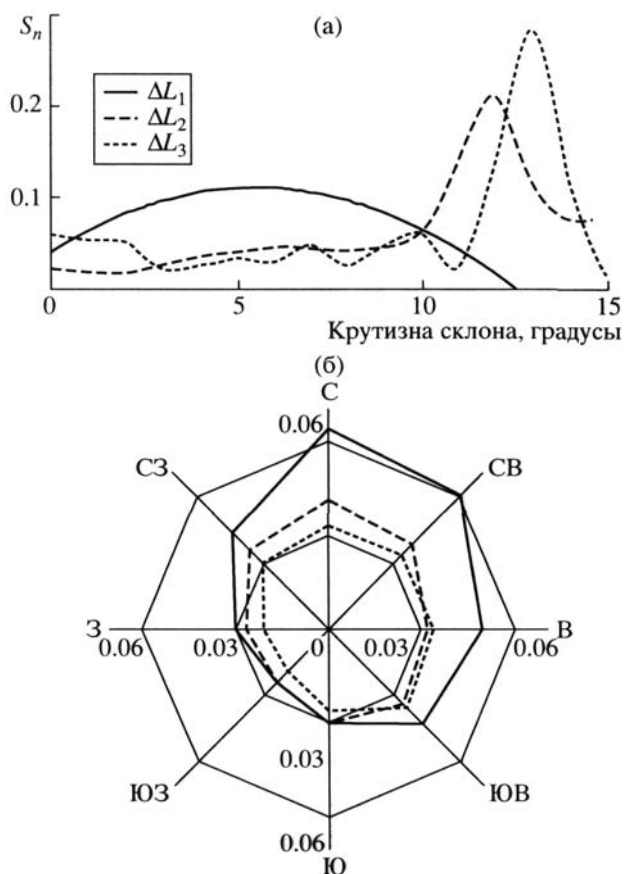


Рис. 1. Картошемы объекта исследования: а - 1973 г., б - 2000 г.  
 1 - фон, 2 - редины и редколесья ( $СК < 0.3$ ), 3 - древостои ( $L_3 > СК \geq 0.3$ ). Штриховой линией выделен участок Ары-Мас.



**Рис. 2.** Распределение нормированного прироста площадей лиственничников по элементам рельефа, а - по высоте территории над у.м., б - по азимутам.  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$ ,  $\Delta L_3$  - прирост площади лиственничников сомкнутостью  $L_1-L_3$ ,  $S_n$  - нормированная площадь лиственничников.

Фактическая граница леса не соответствует ее потенциально возможному положению. При похолодании граница леса проходит выше его климатической границы вследствие большей устойчивости древесных растений по сравнению с подростом. При потеплении также наблюдается эффект запаздывания: продвижение леса в тундру лимитируется плодоношением, распространением и прорастанием семян, сохранностью подроста [3, 6]. Выделяются два основных типа продвижения деревьев в тундру. 1. Распространение от "материнской стены леса" на величину радиуса разлета семян (50-60 м; перенос семян с тальми водами на рассматриваемой территории исключен, поскольку лиственница продвигается по градиенту высоты). Последующая волна расселения может наблюдаться по достижении деревцами возраста плодоношения (т.е. через ~30 лет). Этот тип расселения в основном формирует "диффузную" границу леса. 2.

Распространение от отдельных деревьев или стланиковых форм лиственницы, которые могут находиться на расстоянии до 1-3 км от материнского древостоя ("мозаичная" граница леса). Вероятная причина появления этих продвинутых в зону тундры форм - птицы и мелкие млекопитающие; возможно также, что это "рефугиумы", возникшие в период потепления 30-40-х годов и сохранившиеся, например, в локальных защищенных от ветра депрессиях. Вследствие способности нижних ветвей к укоренению лиственничный стланик нередко состоит из нескольких стеблей, формирующих при благоприятных условиях куртины лиственниц. Это является вероятной причиной рассмотренного выше перехода класса "фон" в лиственничники, а также объясняет достаточно высокие скорости продвижения лиственничных редколесов в тундру (3-11 м/год). Проникновение деревьев в тундру более инерционно по сравнению с динамикой сомкнутости крон, что и отображают данные дешифрирования снимков Landsat. Следует отметить, что проникновение древесной растительности в тундру носит циклический характер: в период потепления 30-40-х годов прошлого века также наблюдалось "наступление леса на тундру" [12, 13].

Таким образом, на примере самого северного в мире лесного массива показано возрастание величины сомкнутости лиственничников и проникновение лиственницы в зону тундры в конце XX столетия, индуцированное климатическими изменениями. В то же время с юга и запада наблюдается экспансия темнохвойных древесных пород (сосны сибирской, ели и пихты) в зону доминирования лиственницы [14].

Работа поддержана грантом РФФИ 03-05-65333 и грантом НАСА "Науки о Земле".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC (2001). Climate change 2001. Working Group I. The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP, WMO. III Assessment Rept. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. V. 1.
2. Kharuk V.I., Shiyatov S.G., Naurzbaev M.M. Proc. IB-FRA'98. Oslo: NFR, 1999. P. 19-23.
3. Kharuk V.I., Fedotova E.V. Arctic Environment Variability in the Context of Global Change. Heidelberg: Springer-Practice, 2003. P. 281-299.
4. Cwynar L.C., Spear R.W. // Ecology 1991. V. 72. P. 202-212.
5. Kullman L., Kjallgreu L. // Arct. and Antarct. Appl. Res. 2000. № 32. P. 419-428.
6. Shiyatov S.G. // PAGES News. V. 11. № 1. 2003. P. 8-10.

7. Ваганов Е.А., Бриффа К.А., Наурзбаев М.М. и др. // ДАН. 2000. Т. 375. № 1. С. 103-106.
8. Mupeni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J. et al. // Nature. 1997. V. 386. P. 698-702.
9. Rees G., Brown I., Mikkola K. et al. // АМБИО. 2002. № 12. P. 56-62.
10. Ары-Мас / Под ред. Б.Н. Норина. Л.: Наука, 1978. 190 с.
11. Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirilyanov A.V. et al. // Nature. 1999. V. 400. P. 149-151.
12. Тюлина Л.Н. // Тр. Аркт. ин-та. 1937. Т. 63. С. 83-180
13. Толмачев А.И. // Тр. Полярн. комиссии. 1931. В. 5. С. 1-29.
14. Kharuk V.I., Ranson K.J., Tret'yakova V. et al. Proc. Intern. Symp. Improvement of Larch (*Larix* sp.) for Better Growth, Stem form and Wood Quality. Gap: INRA, 2002. P. 289-295.