

## Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата

Н. М. ЧЕБАКОВА, ДЖ. РЕЙФЕЛЬДТ\*, Е. И. ПАРФЕНОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036 Красноярск, Академгородок*

*\*Горная лесная станция Лесной Службы США  
Москоу, 1221, Главная ул., штат Айдахо, 83843, США*

### АННОТАЦИЯ

На основе биоклиматических моделей, связывающих характеристики растительности с климатом, рассчитаны изменения площадей растительных зон в пределах Средней Сибири и популяций *Larix sibirica* Ledeb. и *Pinus sylvestris* L. на юге Красноярского края и Тувы при потеплении климата. К концу века прогнозируется полная перестройка как растительных зон на равнинах и плоскогорьях, так и климатипов сосны и лиственницы в горах и предгорьях юга территории. Преобладающие в современном климате тундра, лесотундра и северная тайга заместятся южными типами растительности - южной тайгой и подтайгой, а также лесостепью и степью, ныне не произрастающими выше 56° с.ш. Темнохвойная тайга будет продвигаться к востоку по мере отступления вечной мерзлоты. Климатипы сосны обыкновенной и лиственницы сибирской, доминирующие сегодня, будут либо занимать небольшие площади, либо совсем исчезнут. И наоборот, климатипы, которые будут доминировать в будущем, сегодня либо отсутствуют, либо невелики по площади.

За последние 200 лет накоплено достаточно прямых и косвенных доказательств потепления климата [1]. Последние результаты тестирования модели глобальной циркуляции атмосферы Хадли Центра [2] показали, что в бореальной зоне и в Сибири в частности в течение последующих ста лет летние температуры могут повыситься на 4-6 °С, что обусловит быстрые темпы потепления - до 0,4-0,6 °С за десятилетие. Такие быстрые темпы могут вызвать изменения растительности на всех иерархических уровнях - зональном [3], экосистемном [4], видовом [5] и популяционном [6].

Целью нашего исследования является оценка-влияния потепления климата на пространственную перестройку растительности на высшем уровне ее организации - зональном в Средней Сибири и низшем уровне организации - популяционном для климатипов

лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на юге Красноярского края и Тувы.

### МЕТОДЫ

*Территория.* Зональная растительность изучалась на территории в рамках широт 56-75° с.ш. и долгот 90-120° в. д., включающей равнины и плоскогорья Средней Сибири. Климатипы сосны и лиственницы изучались в горах Южной Сибири в рамках 50-56° с. ш. и 89°, 96° в. д., включающих Кузнецкий Алатау, Западный и Восточный Саяны и прилегающие котловины юга Красноярского края и Хакасии, а также Танну-Ола и Сангилен и прилегающие котловины Тувинскую, Убсу-Нурскую и Тоджинскую в Туве. Цифровая модель рельефа данной территории получена из [7] с разрешением 1 км в пикселе.

*Биоклиматическая модель.* Наша модель представляет собой набор климатических границ, детерминирующих зоны растительности Сибири. В данной работе мы частично модифицировали нашу предыдущую биомную модель Сибири [8]. Мы заменили индекс континентальности суммами отрицательных температур и индекс сухости другим индексом увлажнения, равным отношению сумм градусо-дней ( $GDD_5$ ) к годовому количеству осадков. Третий индекс - суммы градусо-дней ( $GDD_5$ ) - оставили прежним. Этот показатель, принятый в англоязычной литературе, по величине меньше сумм температур, принятых в русской климатологии, так как для их расчета суммируются только температуры выше  $5^\circ\text{C}$ .

Для расчета климатических индексов использовались данные о температуре воздуха и осадках 200 метеостанций на равнинной части Средней Сибири [9].

Следующие растительные зоны выделяются на территории Сибири [10, 11]: тундра; лесотундра и редколесья; темнохвойная тайга (северная, средняя и южная); светлохвойная тайга (северная, средняя и южная); березовая и светлохвойная подтайга; лесостепь и степь.

Для 150 метеостанций на территории всей Сибири были определены зональные типы растительности, которые были ординированы в соответствующих парах осей: градусо-дней выше  $5^\circ\text{C}$  - индекса увлажнения и градусо-дней выше  $5^\circ\text{C}$  - сумм температур ниже  $0^\circ\text{C}$ . Из этих ординаций были определены климатические границы, разделяющие зоны растительности Сибири (рис. 1, А и Б). Поскольку березовая и светлохвойная подтайга климатически не отделялись от южной тайги, эти классы были объединены соответственно с темно- и светлохвойной южной тайгой. В модель были добавлены еще три класса с перспективой их появления при потеплении климата - полупустыня, умеренная лесостепь и умеренный широколиственный лес.

*Климатипы.* Мы основываемся на принятом в лесной селекции определении климатипа как климатически обусловленного экотипа по Г. Турессону [12]. В данной работе мы используем результаты внутривидового подразделения сосны обыкновенной и лиственницы сибирской на климатипы, полученные Рейфелдтом и др. [13, 14] количественными

методами на основе климатических показателей. Авторы аппроксимируют функцией Вейбулла зависимость сохранности и роста географических культур от различий между климатами мест происхождения семян и их интродукции. Исходными данными для построения функций Вайбулла послужили многочисленные литературные данные по географическим культурам, собранные по территории бывшего Советского Союза: 313 происхождений сосны обыкновенной, тестированных в 36 климатах, и 130 происхождений лиственницы (63 из которых - *L. sibirica*, 42 - *L. gmelinii* и 25 - *L. sukaczewii*), тестированных в восьми климатах. В данной работе используются три функции, основанные соответственно на суммах тепла выше  $5^\circ\text{C}$ , суммах отрицательных температур ниже  $0^\circ\text{C}$  и индекса увлажнения.

На рис. 2 дан пример функции Вайбулла, описывающей сохранность (%) сосны в зависимости от различий условий увлажнения (в единицах индекса увлажнения) мест интродукции от условий мест происхождения. Функция показывает, что сохранность уменьшается по мере удаления от нуля ( $X_v$ ), т. е. нулевой разности между оптимальным климатом происхождения семян и климатом их интродукции. Доверительный интервал вершины функции ( $Y_v$ ), показывающей максимальную сохранность в месте произрастания, имеет биологический смысл [13]: его нижняя линия пересекает функцию в двух точках  $X_1$  и  $X_2$ , расстояние между которыми определяет климатический диапазон, в котором посаженные семена с высокой вероятностью (в нашем случае 80%) покажут оптимальные показатели сохранности и роста, т. е. будут максимально адаптированы к данному климату. Эти же климатические пределы отражают расстояния, на которые семена могут быть переброшены без ущерба их сохранности и росту. Они же разделяют генетически различные популяции.

Таким образом были определены следующие количественные диапазоны для климатипов сосны обыкновенной по трем климатическим показателям:  $480^\circ\text{C}$  сумм температур выше  $5^\circ\text{C}$ ,  $-1150^\circ\text{C}$  сумм отрицательных температур и 1,2 единиц индекса увлажнения. Количество климатипов по каждому показателю было определено делением климатического ареала распространения вида (в на-

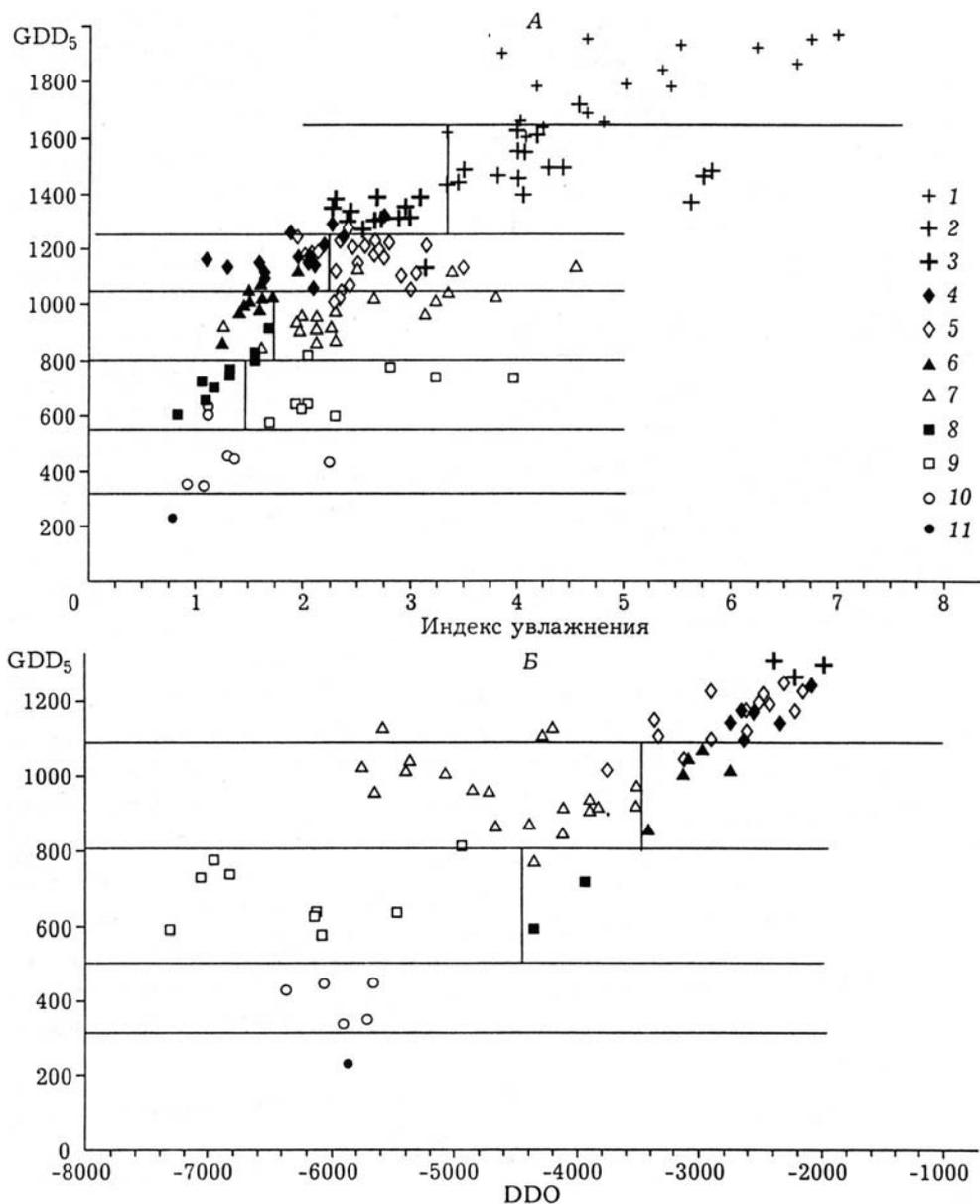


Рис. 1. Ординации растительных зон в осях (А) сумм градусо-дней выше 5 °С (GDD<sub>5</sub>) и индекса увлажнения и (Б) сумм градусо-дней выше 5 °С (GDD<sub>5</sub>) и сумм отрицательных градусо-дней (DD<sub>0</sub>). Линии - климатические границы, разделяющие зоны.

1 - полупустыня; 2 - степь; 3 - лесостепь; 4 - южная темнохвойная тайга и березовая подтайга; 5 - южная светлохвойная тайга и светлохвойная подтайга; 6 - средняя темнохвойная тайга; 7 - средняя светлохвойная тайга; 8 - северная темнохвойная тайга; 9 - северная светлохвойная тайга; 10 - лесотундра и редколесья; 11 - тундра.

шем случае полученного из данных по географическим культурам) на соответствующий климатический диапазон. Например, для сумм температур выше 5 °С получено пять климатипов  $(2916 - 626)/480 = 5$ ; для сумм отрицательных температур - шесть климатипов и для индекса увлажнения также шесть климатипов. Таким образом, количество возможных климатипов сосны обыкновенной, определенных из трех климатических показателей, будет равно количеству их сочетаний по трем показа-

телям, т.е.  $5 \times 6 \times 6 = 180$ . Аналогичным образом были определены все возможные климатипы лиственницы сибирской, и их количество оказалось соответственно равным  $3 \times 2 \times 8 = 48$ .

Однако некоторые сочетания климатических градаций не реализуются в современном климате, как, например, низкие показатели индекса увлажнения, имеющие место в морском климате (Прибалтика), с большими отрицательными суммами температур, имеющими место в сильно континентальном кли-

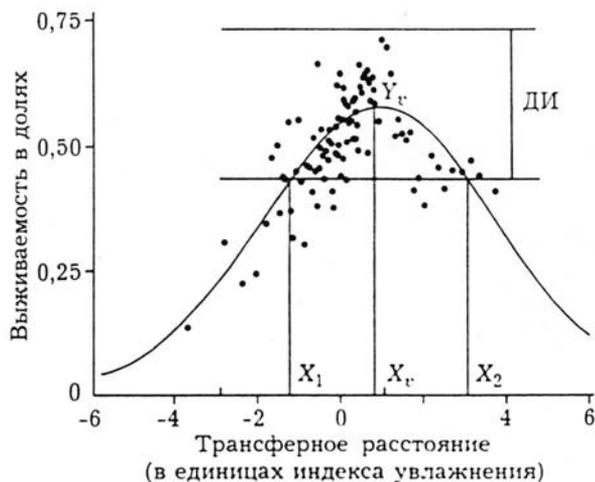


Рис. 2. Функция Вайбулла, описывающая сохранность сосны обыкновенной в зависимости от различий между климатами места интродукции и места происхождения семян.

ДИ - доверительный интервал вершины функции  $Y_v$  в оптимальном климате ( $X_r$ ). Расстояние между  $X_1$  и  $X_2$  определяет климатический диапазон для одного климатипа, или ширину семенной зоны.

мате (Якутия). Кроме того, некоторые сочетания, хотя и потенциально возможны для произрастания сосны или лиственницы, могут быть заняты более конкурентоспособными темнохвойными породами. В Западном Саяне, например, П. М. Ермоленко [15] указывает на появление сосны на месте темнохвойных пород после минерализации почвы, вызванной строительством дорог. Ввиду возможности реализации всех или части климатических

сочетаний при потеплении климата мы включили в анализ все потенциальные сочетания.

На территории бывшего Советского Союза в лесосеменном районировании [16] выделяется 255 лесосеменных подрайонов сосны обыкновенной и 75 подрайонов лиственницы сибирской. Мы рассматриваем подрайон в качестве климатипа, так как он характеризуется наибольшей однородностью лесорастительных условий и генотипического состава популяций, т. е. отвечает определению климатипа. В то же время, как было показано выше, в рамках ареала этих пород нами теоретически выделяется 180 климатипов сосны и 48 климатипов лиственницы. Следует отметить, что при аналитическом подходе на основе объективных климатических показателей выделяется несколько меньшее количество климатипов, чем при экспериментальном подходе, выполненном на экспертном анализе результатов исследований географических культур и практики по переброске семян. Существенное завышение количества климатов на равнинной территории в достаточно однородных климатических условиях вызвано дополнительным административным подразделением районов. Для горных территорий, где климатические условия чрезвычайно разнообразны и меняются от сухих и теплых подтаежных лесов до

Таблица 1  
Площади ( $10^4$  км<sup>2</sup>) растительных зон Средней Сибири в современном и будущем климатах

Растительная зона	Современный климат	Доля от общей площади, %	Климат к 2090 г.	Доля от общей площади, %
Не покрытая растительностью	3,6	1,3	-	-
Тундра	35,8	12,5	0,1	0,0
Лесотундра и редколесье	54,3	19,0	1,6	0,6
Северная темнохвойная тайга	22,5	7,9	17,8	6,2
Северная светлохвойная тайга	62,5	21,9	3,2	1,1
Средняя темнохвойная тайга	3,1	1,1	12,6	4,4
Средняя светлохвойная тайга	75,3	26,4	17,0	6,0
Южная темнохвойная тайга и березовая подтайга	13,1	4,6	9,2	3,2
Южная светлохвойная тайга и подтайга	15,2	5,3	56,1	19,6
Лесостепь	0,3	0,1	99,0	34,7
Степь	-	-	22,6	7,9
Полупустыня	-	-	19,4	6,8
Умеренный широколиственный лес	-	-	0,6	0,2
Умеренная лесостепь	-	-	26,5	9,3
ВСЕГО	285,7	100	285,7	100

влажных и холодных подгольцовых лесов, количество климатипов явно занижается. В нашем горном регионе на юге Красноярского края и в Туве в соответствии с лесосеменным районированием выделяется только 8 климатипов сосны и 12 климатипов лиственницы, в то время как мы аналитически обосновываем 26 и 24 климатипа соответственно.

*Картирование* растительных зон и климатипов обеих пород в современном климате и при его изменении производилось сопряжением карт трех климатических индексов для настоящего и будущего климатов с климатическими границами растительных зон и климатипов.

Карты климатических индексов получены сплайновой интерполяцией данных метеостанций по методу Хатчинсона [17] путем сопряжения их с цифровой моделью рельефа с размером пикселя 30 с. Карты климатических индексов для 2090 г. рассчитывались с учетом сценария Хадли Центра [2]. В соответствии с этим сценарием на данной территории ожидается увеличение летних температур на 4-6 °С, зимних температур - на 3-9 °С и годового количества осадков до 25 %, хотя, например, в Убсу-Нурской котловине прогнозируется 4%-е уменьшение осадков. Индексы для будущего климата в каждом пикселе пересчитывались по регрессиям, связывающим суммы тепла с температурой июля ( $R^2 = 0,90$ ), суммы холода - с температурой января ( $R^2 = 0,96$ ). Индекс увлажнения пересчитывался с учетом новых сумм и количества осадков, полученного умножением их современного количества на коэффициент изменения в соответствии со сценарием.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Растительные зоны.* Структура зональной растительности Средней Сибири, смоделированная с помощью нашей биоклиматической модели, такова (табл. 1 и рис. 3, А). В современном климате на данной территории преобладает светлохвойная тайга, в качестве основных лесообразователей которой являются лиственницы сибирская и Гмелина. Сосна обыкновенная появляется в средней и даже северной тайге на теплых песчаных почвах широких долин и может доминировать в более теплом климате южной тайги и подтай-

ги. Темнохвойная тайга занимает в Средней Сибири значительно меньшие площади, и это, в основном, приподнятые формы рельефа, как, например, Енисейский кряж. На север и восток проникновение темнохвойных пород ограничивает почвенный климат - вечная мерзлота. В настоящем климате более 60 % территории занято северными типами растительности, такими как тундра, лесотундра и северная тайга. Около четверти территории занято средней тайгой, причем в основном светлохвойной, и только 10 % занято южной тайгой, примерно в равных частях представляющих светло- и темнохвойную тайгу. На рассматриваемой территории выше 56° с. ш. совсем не отмечено степей и только доли процента лесостепей.

При потеплении климата прогнозируются огромные изменения в растительном покрове Средней Сибири (см. табл. 1 и рис. 3, Б). Южные типы растительности - южная тайга, подтайга и лесостепь - существенно увеличатся и будут занимать около 70 % площади. Северная и средняя тайга вместе будут покрывать менее 20 % общей площади. Тундра исчезнет совсем, а лесотундра будет занимать менее 1 % площади. Современные тундровые и лесотундровые позиции на плато Путорана и Анабар будут заняты темнохвойной тайгой, а прилегающие к обоим плато лесотундра и редколесья - замещены светлохвойной тайгой и местами даже лесостепью. Оба факта говорят в пользу отступления вечной мерзлоты при потеплении климата, а по мере ее отступления - стока оттаявшей воды и создания условий для лесостепи, которая в современном климате находится в 1000 км от подножий плато Путорана.

Хотя, как было сказано, в современном климате Средней Сибири севернее 56° с. ш. не отмечается степей и лесостепей и тем более полупустыни, к 2090 г. эти типы растительности будут занимать около половины территории. Большие площади степей прогнозируются на Центрально-Якутской равнине и Центрально-Тунгусском плато, а на Приангарском плато значительная площадь окажется открытой полупустыней (см. рис. 3, Б).

Наша модель показывает, что кроме полупустыни появятся еще два новых типа растительности, не существующих на нашей территории сегодня. Это умеренная лесостепь и

Площадь (км<sup>2</sup>), занимаемая климатипами сосны обыкновенной в современном и будущем климатах

Номер климатипа*	Климатические параметры климатипа			В современном климате	Доля от общей площади, %	В климате 2090 г.	Доля от общей площади, %
	Градусо-дни выше 5 °С	Индекс увлажнения	Суммы температур ниже 0 °С				
0		Вне ареала		93383	29,16	29282	8,9
2	600-1080	0,6-1,8	3700-4850	5565	1,72		
3	600-1080	0,6-1,8	2550-3700	21556	6,79	8676	2,67
4	600-1080	0,6-1,8	1400-2550	47974	15,76	18293	5,77
5	600-1080	0,6-1,8	250-1400			0,7	0,00
8	600-1080	1,8-3,0	3700-4850	6618	2,03		
9	600-1080	1,8-3,0	2550-3700	7985	2,47	4331	1,31
10	600-1080	1,8-3,0	1400-2550	6004	1,99	67	0,02
14	600-1080	3,0-4,2	3700-4850	1743	0,53		
15	600-1080	3,0-4,2	2550-3700	1652	0,51	64	0,02
20	600-1080	4,2-5,4	3700-4850	525	0,16		
21	600-1080	4,2-5,4	2550-3700	253	0,08		
26	600-1080	5,4-6,6	3700-4850	309	0,09		
32	1080-1560	6,6-7,0	3700-4850	70	0,02		
39	1080-1560	0,6-1,8	2550-3700	113		6884	2,16
40	1080-1560	0,6-1,8	1400-2550	13993	4,6	37131	11,99
44	1080-1560	1,8-3,0	3700-4850	1715	0,53		
45	1080-1560	1,8-3,0	2550-3700	798	0,25	19729	6,11
46	1080-1560	1,8-3,0	1400-2550	59278	19,87	12181	
50	1080-1560	3,0-4,2	3700-4850	6250	1,93		
51	1080-1560	3,0-4,2	2550-3700	2406	0,74	8779	2,69
52	1080-1560	3,0-4,2	1400-2550	16900	5,55	46	0,01
56	1080-1560	4,2-5,4	3700-4850	4592	1,41		
57	1080-1560	4,2-5,4	2550-3700	2835	0,87	2060	0,63
58	1080-1560	4,2-5,4	1400-2550	1625	0,53		
62	1080-1560	5,4-6,6	3700-4850	4020	1,22		
63	1080-1560	5,4-6,6	2550-3700	2143	0,66	617	0,19
68	1080-1560	6,6-7,0	3700-4850	1112	0,34		
69	1080-1560	6,6-7,0	2550-3700	495	0,15	86	0,03
76	1560-2040	0,6-1,8	1400-2550			9033	2,94
81	1560-2040	1,8-3,0	2550-3700			1201	0,38
82	1560-2040	1,8-3,0	1400-2550			44558	14,7
87	1560-2040	3,0-4,2	2550-3700			8522	2,64
88	1560-2040	3,0-4,2	1400-2550			43240	14,46
92	1560-2040	4,2-5,4	3700-4850			5	0,00
93	1560-2040	4,2-5,4	2550-3700			9929	3,06
94	1560-2040	4,2-5,4	1400-2550			12455	4,14
98	1560-2040	5,4-6,6	3700-4850			315	0,1
99	1560-2040	5,4-6,6	2550-3700			7367	2,27
100	1560-2040	5,4-6,6	1400-2550			3511	1,16
104	1560-2040	6,6-7,0	3700-4850			34	0,01
105	1560-2040	6,6-7,0	2550-3700			1610	0,49
106	1560-2040	6,6-7,0	1400-2550			72	0,02
118	2040-2520	1,8-3,0	1400-2550			35	0,01
124	2040-2520	3,0-4,2	1400-2550			8003	2,7
130	2040-2520	4,2-5,4	1400-2550			7914	2,62
134	2040-2520	5,4-6,6	3700-4850			24	0,01
135	2040-2520	5,4-6,6	2550-3700			453	0,14
136	2040-2520	5,4-6,6	1400-2550			4876	1,6
140	2040-2520	6,6-7,0	3700-4850			51	0,2
141	2040-2520	6,6-7,0	2550-3700			465	0,14
142	2040-2520	6,6-7,0	1400-2550			20	0,01

\* Даны только реализованные климатипы.

широколиственный лес, климатические границы которых были определены по глобальной биомной модели [18]. Умеренная лесостепь покрывает большие площади на Енисейском и Ангарском кряжах, Приангарском и Центрально-Тунгусском плато и частично на Становом нагорье (см. рис. 3, Б). Появление широколиственного леса можно ожидать в небольшой долине р. Вельмо (около 63° с. ш. и 93° в. д.). Такой прогноз можно считать вполне возможным, так как до сих пор существуют реликтовые липовые острова в Кузнецком Алатау [19]. В середине голоцена, характеризующейся теплым климатом, Н. А. Хотинский [20] реконструировал широколиственные породы на Васюганской равнине в Западной Сибири, что находится в 2000 км к востоку от их современной восточной границы.

*Климатипы.* Для сосны обыкновенной из 180 возможных климатипов (табл. 2) только 26 могут произрастать в современном климате на данной территории. В целом, сосна обыкновенная может занимать 70 % территории, но занимает только около 10 %, так как вытеснена темнохвойными породами на песчаные почвы. Около 30 % территории остается вне климатического диапазона ее произрастания.

Безусловно, не все климатипы, которые могут произрастать сегодня, равнозначны по площади. Например, двенадцать из них занимают только 0,5 % общей площади, пять из них - около 5 %, а два - 36 % площади. И это - два климатипа, которые растут в подтайге предгорий, в теплом и засушливом климате.

Будущий климат, как он прогнозируется по сценарию Хадли Центра, будет более благоприятным для произрастания сосны обыкновенной - она может занимать почти всю территорию. Только 9 % территории, самые высокогорья, останутся вне ее климатических пределов. Почти на 63 тыс. км<sup>2</sup> увеличится ее ареал на данной территории. Соответственно увеличится число климатипов, способных произрастать здесь, - с 26 до 35 (см. табл. 2).

Однако по-прежнему большинство из них будет занимать менее 1 % площади и только три - от 12 до 15 %.

Самыми распространенными в будущем климате будут совсем другие климатипы. Например, климатипы 82-й и 88-й, не существующие в современном климате, будут преобладать к 2090 г. Современный климатип 40-й

увеличится в 2,5 раза, и, наоборот, большие по площади современные климатипы 4-й и 46-й, хотя и сохранятся через 100 лет, сократятся в 5 раз.

В целом, к 2090 г. должны исчезнуть 12 современных климатипов, но должны появиться 23 новых. Только 13 климатипов будут общими для современного и потеплевшего климатов.

Для лиственницы сибирской из 48 возможных климатипов на нашей территории сегодня реализуется только половина (табл. 3). Эти климатипы могут покрыть 67 % территории, хотя в реальности лиственница занимает меньшие площади, так как вступают в силу фитоценоотические отношения между лиственницей и кедром в холодном климате высокогорий и лиственницей и сосной в засушливом климате низкогорий.

Из 24 климатипов на нашей территории 11 занимают менее 1 % территории и только два климатипа занимают в сумме 36 % территории, т. е. больше половины, на которой лиственница может произрастать.

Потеплевший климат будет более благоприятным для лиственницы сибирской. Количество реализованных климатипов увеличится на 10, а площадь, которую они могут занять через 100 лет, увеличится на 24 %. Однако по-прежнему большинство климатипов будет занимать небольшие площади, и только один климатип - 20-й - будет преобладающим.

Как и в случае с сосной, произойдет перераспределение климатипов по территории. Два крупных современных климатипа, занимающих 36 % территории, будут занимать менее 5 %. И наоборот - один крупный климатип будущего климата сегодня занимает менее 1 % территории. В целом, через сто лет исчезнут семь современных климатипов, но появятся четырнадцать новых, которых сегодня нет.

Изменения климата окажут существенное воздействие на перераспределение генотипов в пределах одной древесной породы. Интересно оценить современное географическое положение климатипов, которые будут доминировать в будущем климате на нашей территории. Так, один из трех климатипов сосны обыкновенной, занимающий небольшую площадь на юге Красноярского края, является преобладающим в предгорьях Алтая, в 700 км от нашего региона. Еще два климатипа, кото-

Площадь (км<sup>2</sup>), занимаемая климатипами лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), в современном и будущем климатах

Номер климатипа*	Климатические параметры климатипа			В современном климате	Доля от общей площади, %	В климате 2090 г.	Доля от общей площади, %
	Градусо-дни выше 5 °С	Индекс увлажнения	Суммы температур ниже 0 °С				
0		Вне ареала		103636	32,53	26043	7,96
1	650-1300	0,8-1,8	2200-4500	58330	18,84	26741	8,33
2	650-1300	0,8-1,8	1200-2200	14945	4,95	19482	6,27
3	650-1300	1,8-2,8	2200-4500	50777	16,68	12845	3,94
4	650-1300	1,8-2,8	1200-2200	15064	5,03	142	0,04
5	650-1300	2,8-3,8	2200-4500	20351	6,52	2325	0,7
6	650-1300	2,8-3,8	1200-2200	2501	0,83		
7	650-1300	3,8-4,8	2200-4500	6179	1,92	667	0,2
8	650-1300	3,8-4,8	1200-2200	46	0,02		
9	650-1300	4,8-5,8	2200-4500	2753	0,84	154	0,05
11	650-1300	5,8-6,8	2200-4500	1355	0,41	3	0,00
13	650-1300	6,8-7,8	2200-4500	552	0,17		
15	650-1300	7,8-8,5	2200-4500	286	0,09		
17	1300-1950	0,8-1,8	2200-4500	261	0,08	5532	1,76
18	1300-1950	0,8-1,8	1200-2200	93	0,03	24060	7,85
19	1300-1950	1,8-2,8	2200-4500	4276	1,4	14863	4,65
20	1300-1950	1,8-2,8	1200-2200	2376	0,78	39466	12,97
21	1300-1950	2,8-3,8	2200-4500	4855	1,6	14191	4,4
22	1300-1950	2,8-3,8	1200-2200	4009	1,29	22296	7,41
23	1300-1950	3,8-4,8	2200-4500	5923	1,89	10619	3,27
24	1300-1950	3,8-4,8	1200-2200	1117	0,36	7489	2,48
25	1300-1950	3,8-4,8	2200-4500	3420	1,05	7789	2,39
26	1300-1950	3,8-4,8	1200-2200			1583	0,52
27	1300-1950	5,8-6,8	2200-4500	3755	1,15	4397	1,35
28	1300-1950	5,8-6,8	1200-2200			264	0,09
29	1300-1950	6,8-7,8	2200-4500	3264	0,99	2657	0,81
30	1300-1950	6,8-7,8	1200-2200			3	0,00
31	1300-1950	7,8-8,5	2200-4500	175	0,54	1167	0,36
36	1950-2350	1,8-2,8	1200-2200			3127	1,02
38	1950-2350	2,8-3,8	1200-2200			20078	6,76
39	1950-2350	3,8-4,8	2200-4500			0,8	0,00
40	1950-2350	3,8-4,8	1200-2200			23130	7,77
41	1950-2350	4,8-5,8	2200-4500			1020	0,31
42	1950-2350	4,8-5,8	1200-2200			8339	2,75
43	1950-2350	5,8-6,8	2200-4500			2207	0,68
44	1950-2350	5,8-6,8	1200-2200			4484	1,47
45	1950-2350	6,8-7,8	2200-4500			2700	0,83
46	1950-2350	6,8-7,8	1200-2200			4,4	0,00
47	1950-2350	7,8-8,5	2200-4500			2053	0,63

\* Даны только реализованные климатипы.

рые не произрастают на нашей территории сегодня, но будут доминирующими при потеплении климата, представляют собой изолированные популяции в Башкирии и Северном Казахстане, т. е. в 1200 км к западу. Интересно, что климатип лиственницы сибирской, который будет преобладать на нашей территории в будущем, сегодня растет на Алтае. Кроме того, климатические условия, благоприятные для этого климатипа, реализуются

также на европейской части России, к западу от Урала. Поскольку на европейской части доминирует лиственница Сукачева, то можно предположить, что в предгорьях Саян при изменении климата создадутся условия, благоприятные для различных видов лиственницы и их гибридов. Очевидно, что генотипы, которые будут составлять важную часть будущей лесной растительности на нашей территории, сегодня находятся далеко от их местопроиз-

растания. Эти расстояния иллюстрируют величину и сложность внутривидовой подстройки, необходимой виду, чтобы физиологически соответствовать новому климату.

Очевидно, что при потеплении климата растительные зоны не будут сдвигаться как единое целое. Отдельные виды с разными скоростями миграции будут передвигаться и образовывать новые зоны. Процесс формирования зон сложный и, как следует из палеогеографии, на равнинах занимает тысячелетия. В горах этот процесс происходит быстрее, поскольку скорость естественной миграции 20-40 м в год [21] соизмерима с шириной высотной зоны - 500-1000 м. За период больших климатических изменений, прогнозируемых на ближайшие 100 лет, древесная порода будет способна покрыть расстояния до 2000 м при таких скоростях миграции.

Лесные пожары и таяние вечной мерзлоты будут формировать облик растительных зон и корректировать модельные прогнозы. Наши весьма предварительные расчеты количества воды, которая может оттаять в мерзлотной зоне Средней Сибири в соответствии с данным сценарием потепления климата, показывают, что левый берег Енисея может оказаться еще более заболоченным. В Якутии при отступании вечной мерзлоты, которая в современном климате обеспечивает влагу для произрастания лесов в зоне зональных степей, вместо лесов должны появиться степи или болота в условиях слабого стока в некоторых формах рельефа. Отмирание деревьев приведет к накоплению огромных количеств горючих материалов, которые и создадут потенциал для беспрецедентных лесных пожаров, довершающих картину перестройки растительных зон [22].

Изменения климата приведут к изменению приспособляемости древесных видов, которые состоят из климатипов. Исследования Рейфельдта и др. [6, 13, 23] показывают, что внутривидовая подстройка к изменениям будет нетривиальной. Реакция на изменение климата - это не просто движение видов или зон, а пространственная «перестройка» генотипа вида в ландшафте [21, 23]. Если миграция - единственный механизм, с помощью которого генотипы видов могут внедряться в климаты, находящиеся за пределами современных ареалов, то естественный отбор - это

механизм, с помощью которого генотипы изменяются под влиянием внешней среды в пределах их ареалов. Скорости миграции достаточно медленные [21], а реакции на естественный отбор могут быть достаточно быстрыми, хотя и существует некий предел, ограничивающий изменения генетической системы в течение одного поколения. Расчеты для *P. sylvestris* [23] показывают, что в Сибири потребуется от 5 до 10 поколений, чтобы соответствующим образом перераспределить климатипы при потеплении климата. Процесс, с помощью которого генотипы перераспределяются внутри вида, может занять века, даже если распределение вида не меняется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши расчеты показывают, что изменения климата вызовут далеко идущие последствия для будущих лесов. Аналоги будущих лесов Сибири существуют сегодня, и нет сомнений в том, что растительность будет способна измениться при потеплении климата, прогнозируемом по моделям глобальной циркуляции атмосферы. Поскольку изменения эти будут велики, потребуется длительное время, чтобы природные системы смогли к ним подстроиться. С экологической точки зрения, именно темпы климатических изменений более важны для выживания растений, чем диапазон этих изменений. К 2090 г. климат на рассматриваемой территории будет лишь немногим более благоприятным для сосны обыкновенной и лиственницы сибирской, чем современный, но тем не менее распределение климатов претерпит полную перестройку. Климатипы, доминирующие сегодня, будут либо занимать небольшие площади, либо совсем исчезнут. И наоборот, климатипы, которые будут доминировать в будущем, сегодня либо отсутствуют, либо невелики по площади. Даже те климатипы, которые останутся в ландшафте, передвинутся на другие позиции. Чтобы сохранить оптимальную структуру и продуктивность сибирских лесов, необходимо уже сейчас способствовать внедрению таких древесных видов и их климатипов, которые наилучшим образом будут соответствовать ожидаемому климату.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 02-04-49888.

## ЛИТЕРАТУРА

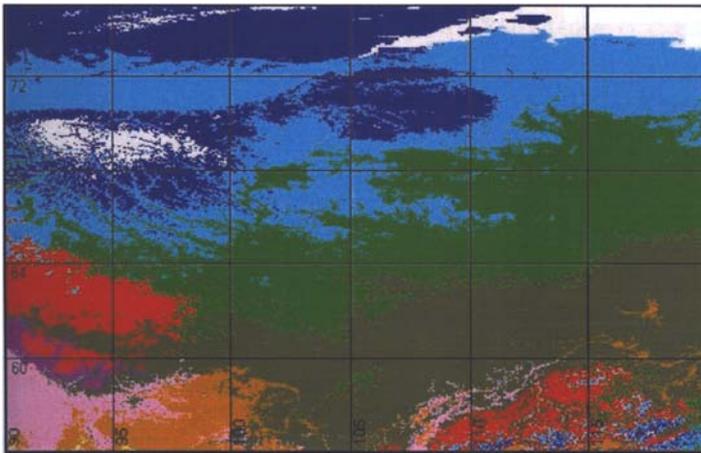
1. M. Hulme, N. Sheard, and A. Markham, Global Climate Change Scenarios, Climatic Research Unit, Norwich, UK, 1999.
2. C. Gordon, C. Cooper, C. Senior, *Climate Dynamics*, 2000, 16, 147-168.
3. R. A. Monserud, N. M. Tchebakova and R. Leemans, *Climatic Change*, 1993, 25, 59-83.
4. A. Guisan, J. I. Holten, R. Spichiger, L. Tessler (Eds.), Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains, Geneva, 1995.
5. L. R. Iverson and A. M. Prasad, *Ecological Monographs*, 1998, 68, 465-485.
6. G. E. Rehfeldt, N. M. Tchebakova, L. K. Barnhardt, *Canadian J. of Forest Research*, 1999, 29, 1660-1668.
7. GLOBE Task Team eds., D. A. Hastings, P. K. Dunbar, G.M. Elphinstone et al., 1999. *The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303, U.S.A.
8. N. M. Tchebakova, R. A. Monserud and D. I. Nazimova, *Can. J. For. Res.* 1994, 24, 1597-1607.
9. Справочники по климату СССР, Л., Гидрометеоздат, 1964-1970, вып. 21, ч. 1, IV.
10. А. Г. Исаченко, А. А. Шляпников, О. Д. Робозерцева, А. З. Филипецкая, Ландшафтная карта СССР, М., ГУГК, 1988.
11. Д. И. Назимова, *Лесоведение*, 1995, 4, 63-73.
12. А. И. Ирошников, Географические культуры и плантации хвойных в Сибири, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1977, 4-110.
13. G. E. Rehfeldt, C. C. Ying, W. R. Wykoff, *Climatic Change*, 2001, 50, 355-376.
14. G. E. Rehfeldt, C. C. Ying, D. L. Spittlehouse, D. L. Hamilton, *Ecological Monographs*, 1999, 69, 375-407.
15. П. М. Ермоленко, Ботанические исследования в Сибири, Красноярск, 1999, вып. 7, 86-90.
16. Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород в СССР. М., Лесн. пром-сть, 1982, 368.
17. M. F. Hutchinson, *ANUSPLIN Version 4.1 User's Guide*. Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra, 2000.
18. N. M. Tchebakova, R. A. Monserud, R. Leemans and S. Golovanov, *J. Biogeogr.*, 1993, 20, 129-144.
19. А. В. Положий, Е. Д. Крапивкина, Реликты третичных широколиственных лесов во флоре Сибири, Томск, ТГУ, 1985, 158.
20. Н. А. Хотинский, Голоцен Северной Евразии, М., Наука, 1977, 200.
21. M. B. Davis and R. G. Shaw, *Science*, 2001, 292, 673-679.
22. V. V. Furyaev, E. A. Vaganov, N. M. Tchebakova and E. N. Valendik, *Eurasian J. For. Res.*, 2001, 2, 1-15.
23. G. E. Rehfeldt, N. M. Tchebakova, Y. I. Parfenova et al., *Global Change Biology*, 2002, 8: 1-18.

## **Redistribution of Vegetation Zones and Populations of *Larix sibirica* Ledeb. and *Pinus sylvestris* L. in Central Siberia in a Warming Climate**

N. M. TCHEBAKOVA, G. REHFELDT, E. I. PARFENOVA

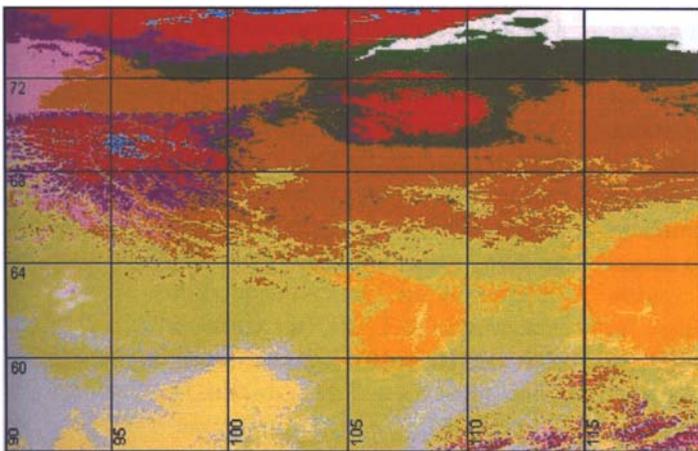
Changes in areal coverage of vegetation zones across Central Siberia and of *Larix sibirica* Ledeb. and *Pinus sylvestris* L. climatypes in southern Krasnoyarsk Territory and Tuva in a warming climate were estimated from bioclimatic models connecting the characteristics of vegetation with climate. Predictions by the models for the end of the century suggest a complete redistribution of both vegetation zones over plains and tablelands of Siberia, and climatypes of pine and larch over southern mountains and foothills. Northern vegetation types - tundra, forest-tundra and northern taiga, which are dominant in current climate, will be replaced by southern types such as the southern taiga and subtaiga, as well as forest-steppe and steppe, both of which do not currently exist north of 56° N. Dark-needled taiga will move eastwards following the retreat of permafrost. Climatypes of *Larix sibirica* Ledeb. and *Pinus sylvestris* L. that occur in the region today will cover small areas or disappear. The climatypes expected to be dominant in the future either cover small areas or do not exist within the region today.

А



- Вода, гольцы
- Тундра
- Лесотундра
- Темнохвойная северная тайга
- Светлохвойная северная тайга
- Темнохвойная средняя тайга
- Светлохвойная средняя тайга
- Темнохвойная южная тайга
- Светлохвойная южная тайга
- Лесостепь

Б



- Вода, гольцы
- Тундра
- Лесотундра
- Темнохвойная северная тайга
- Светлохвойная северная тайга
- Темнохвойная средняя тайга
- Светлохвойная средняя тайга
- Темнохвойная южная тайга
- Светлохвойная южная тайга
- Лесостепь
- Степь
- Полупустыни
- Широколиственные
- Лесостепь умеренной зоны

Рис. 3. Распределение растительных зон в Средней Сибири в современном климате (А) и при его потеплении (Б)