

Лесотундровые листовенные леса и климатические тенденции

VI Харук, KJ Ranson, ST Ima и MM Naurzbaev Институт леса им. В.Н. Сукачева

Сибирского отделения Российской академии наук, Академгородок, Красноярск, 660036

Россия; e-mail: kharuk@ksc.krasn.ru Центр космических
полетов Годдарда, Национальное

управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США; e-mail: jon.ranson@nasa.gov

Получено 25 октября 2005 г.

Аннотация. Проанализированы климатические изменения, произошедшие в листовенных лесах Арымас (самом северном лесном массиве мира) за последние три десятилетия XX века. Анализ снимков дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat 1973 и 2000 гг. свидетельствует об увеличении сомкнутости полога листовенных лесов (на 65%) и расширении листовенности в тундре (на 3–10 м в год) и на территории, относительно слабо защищенной от ветров силой особенностей рельефа (высота, азимут и уклон). Также показано, что радиальный прирост деревьев в кореллирует с летними температурами ($r = 0,65$, $\tau = 0,39$), количество осадков летом ($r = -0,51$, $\tau = 0-41$) и зимой ($r = -0,70$, $\tau = -0,48$), уменьшается с увеличением сомкнутости полога леса ($r = -0,52$, $p > 0,8$; $\tau = -0,48$, $p > 0,95$) и увеличивается с увеличением глубины протаивания почвы ($r = 0,63$, $p > 0,9$; $\tau = 0,46$, $p > 0,9$). Густота подлеска зависит от температуры зимой ($\tau = 0,53$, $p > 0,8$) и летом ($r = 0,98$, $p > 0,99$, $\tau = 0,9$, $p > 0,99$), даты наступления вегетационного периода ($r = -0,60$, $p > 0,99$; $\tau = -0,4$, $p > 0,99$) и отрицательно коррелирует с количеством осадков летом ($r = -0,56$, $p > 0,99$, $\tau = -0,38$, $p > 0,99$).

DOI: 10.1134/S1067413606050018

Ключевые слова: листовенные леса, климатические тенденции, радиальный прирост деревьев, дистанционное зондирование.

Согласно последним климатическим сценариям, к 2100 году температура воздуха и количество осадков на севере Сибири могут увеличиться на 4–6°C и примерно на 25% соответственно (Gordon et al., 2000; IPCC, 2001), что может повлечь за собой сдвиги границы произрастания деревьев на север. Появляется все больше доказательств расширения древностой растительности в тундре как на широтных, так и на высотных границах роста деревьев, а также увеличение плотности полога и радиального прироста деревьев в субтундровых лесах в последние десятилетия XX века (Ваганов и др., 1999; Суарес и др., 1999; Скред и др., 2002; Ллойд и Фасти, 2002; Харук и Федотова, 2003; Шиятов, 2003).

Реакция деревьев на климатические изменения должна быть более выраженной в зоне, где лимитирующим фактором является температура, т.е. в экотоне лесотундры на северной границе произрастания деревьев в Восточной Азии эту границу образуют листовенные насаждения, к которым относится самый северный в мире лесной массив в районе Арымас (72°28' с.ш., 101°40' в.д.). Проследив влияние климатических тенденций на динамику растительности предполагается анализ многолетних рядов наблюдений на пробных площадях в сочетании с дендрохронологическими данными (Шиятов и др., 2005). Дополнительные возможности для такого анализа представляют временные ряды космических снимков, первый из которых датируется 1960-ми годами. Они позволяют специалистам выявлять изменения в растительном покрове и использовать полученные результаты

наземных наблюдений для экстраполяции на региональном и субглобальном уровнях (Myneni et al., 1997; Kharuk et al., 2003).

Целью данного исследования был анализ реакции листовенных лесов лесотундры (на примере лесного массива Арымас) на климатические тенденции с использованием данных наземных обследований и космических снимков.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований простирается от 72°02' до 72°40' с.ш. и от 101°15' до 102°06' в.д. (всего около 36000 га) и включает все бытовыми лесами Арымас и листовенные леса на юго-восточных склонах, спускающихся к р. Хатанге (рис. 1). Расстояние между ними составляет около 34 км, и оба лесных массива схожи по экологическим и месторасположению. Для удобства далее они именуются Арымасским хребтом. Арымасский лес занимает территорию правом берегу реки Новая на высотах до 80 м над ур. моря. Этот своеобразный «лесной остров» впервые был описан Тюиной (1937). Он тянется вдоль реки примерно на 20 км и имеет ширину 0,5–1,5 км, с редкими деревьями, простирающимися от реки, по долине ручья на 3–4 км. На левом берегу древоиды занимают узкую полосу вдоль реки. В абсолютной низине, лежащей на севере, небольшие скопления

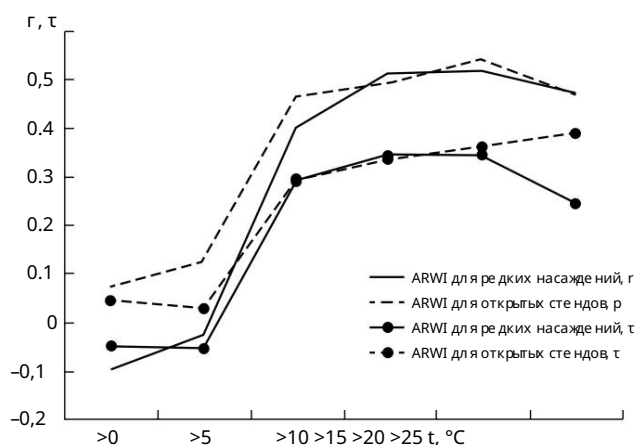


Рис. 1. Зависимость индекса ширины годичных колец (ШГК) от числа дней с температурой воздуха выше значений, указанных на оси абсцисс.

Листовые пластины (преимущественно стелющиеся формы) встречаются в защищенных от ветров местах, например, в понижениях около озер, на расстоянии до 50–70 км от урочища Арым-Мас. Древостои, состоящие из *Larix gmelinii*, имеют следующие параметры: сомкнутость кроны достигает 0,5; класс бонитета 5а–5б; высота и диаметр дерева в среднем 5–8 м и 10–14 см, достигая 10–12 м и 25 см. Возраст дерева достигает 50–700 лет. Многие деревья старше 150 лет поражаются сердцевинной гнилью. Плодоношение начинается, когда возраст дерева достигает 30 лет; шишки обильные и мелкие (1,5–2 см), а всхожесть семян относительно низкая. Плотность молодого прироста дерева колеблется от 100 до 2000 экз./га, в среднем 260 экз./га под пологом леса и 140 экз./га в открытых насаждениях; средняя скорость составляет 200 экз./га. Качество молодняка хорошее: доля погибших особей не превышает 5% (Арым-Мас, 1978).

Климат района исследований резко континентальный, годовое количество осадков составляет около 250 мм, испаряемость — 50–100 мм, средняя температура воздуха — 15°C. Большая часть осадков выпадает летом, максимум приходится на август; среднемесячный период с наибольшим количеством осадков составляет 80–100 ч. Относительная влажность воздуха летом составляет 78%. Ту манеры дик, так как большинство дней ветреные. Примерно треть годового количества осадков выпадает в зимний период, снежный покров держится около 250 дней. Он появляется в конце сентября, на высших элевациях рельефа таит в период декабрь, но на северных склонах и в понижениях часто сохраняется в течение всего лета. Высота снежного покрова достигает максимума в апреле, составляя 30–50 см на открытых участках и 60–70 см на защищенных от ветров участках. Температура воздуха в июне может достигать +29°C, а ее среднемесячное значение составляет +5°C. Период с плюсовыми температурами составляет около 100 дней, но отрицательные температуры и снег могут наблюдаться в течение всего лета. Глубина заморозков

промежуточный зимой и оттепельный летом слой составляет на минерализованных участках 50–70 см (на крутых склонах под редкой еловой или редкими деревьями до 1 м), под моховым покровом — 10–30 см. Зимой низкие температуры в сочетании с сильными ветрами ставят хребты Арым-Мас в число районов Азии с самым суровым климатом. Самый холодный месяц — февраль, среднемесячная температура воздуха составляет — 31°C, абсолютный минимум — 59°C.

Средняя скорость ветра зимой составляет около 5 м/с, число дней с метелями достигает 50 (отдельные годы до 90); примерно 20 дней в году скорость ветра превышает 15 м/с (Арым-Мас, 1978).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные наземных наблюдений. Наиболее ранние данные, использованные в работе, получены в 1969 году и включают геоботанические, почвенные и таксономические описания, карту хребта Арым-Мас и характеристики 12 пробных площадей площадью от 0,25 до 1,0 га (Арым-Мас, 1978). Последующие таксономические обследования проводились в 1989–1991 и 2000 годах. Ксерны отобранные на десяти пробных площадях, использовались для построения древостоев-колец в хронологии, охватывающих период с 1900 по 1990 год. Тренды радиального прироста (y) определялись как тангенсы угла между осью абсцисс и линией регрессии индекса ширины годичного кольца (ШГК). Данные о температуре воздуха и осадках были получены с метеостанции Хатанга, расположенной на расстоянии около 45 км от района исследований. Летний период принимался равным трем месяцам с июня по август, остальные девять месяцев условно считались зимним периодом. Весенняя и осенняя фенофазы выделялись из-за их кратковременности и разброса дат начала и окончания вегетационного периода.

Для выбора меры характеристики продолжительности вегетационного периода, рассматривались следующие параметры: (1) число дней с температурой воздуха выше 0, 5, 10, 15, 20 или 25°C; (2) сумма температур, накопленных в дни, когда температура воздуха превышала эти значения. Согласно результатам нашего анализа, наиболее сильно ARWI коррелировал с числом дней с температурой выше 15°C (рис. 1), то же самое было справедливо и для суммы температур превышающих этот порог. Поэтому в качестве меры продолжительности вегетационного периода было выбрано число дней с температурой выше 15°C. В качестве критерия начала вегетационного периода рассматривалась дата, когда температура воздуха впервые поднялась выше 0, 5 или 10°C, и дата, когда сумма положительных температур превысила 100 или 300°C. Реакция древесных растений (по ARWI и густоте подроста) наблюдалась, когда последний параметр превышал 300°C.

Данные дистанционного зондирования включали (1) изображения со спутника Landsat-MSS (L-MSS, разрешение 57 × 57 м), полученные 26 июля 1973 года, и со спутника Landsat-7 (L-7, разрешение 30 × 30 м), полученные 3 августа,

Таблица 1. Динамика классовземельхребта АрыМас с 1973 по 2000 гг.

Сорт	S1, га (t1, 1973 г.)	S2, га (t2, 2000 г.)	1(S2 – S1), га	2[(S2 – S1)/S1], %	2/(t2 – t1), % в год
Редкие насаждения (L1)	17883	19264	1381	+8	0,29
Открытые трибуны(L2)	13887	16133	2245	+16	0,60
Нормальные стойки (L3)	9415	15601	6186	+66	2.43
Фон	51654	41842	-9812	-19	-1,12

2000; (2) панхроматическое изображение, сделанное Согопа система 28 февраля 1965 г. (размер пикселя 7 × 7 м); и (3) панхроматические аэрофотоснимки, сделанные 31 июля, 1970 г. (масштаб 1 : 35000) и 27 июля 1984 г. (масштаб 1 : 15000). Система Согопа КН-4А работала с августа 1963 г. — октябрь 1969 г., сканирование полосы 19,6 км. шириной и длиной 267 км с разрешением 2,7 м. Все изображения и карты были преобразованы в одну и ту же автономную юнкониескую простую кциюЛамберта и отнесенны к контрольным Топографические точки. Изображения L-MSS и L-7 были повторно отображены до того же разрешения (60 × 60 м) и классифицированы с использованием контрольной информации тогда максимального правдоподобия. Полуженеграничелесотундрыбылоопределено по снимку, сделанному системой Согопа, в какие делевывделалисьна фоне снега из-за тени, которуюониотбрасывают, особенно при низкомсолнце Угол. Матрица высотиспользовалась для исключения из анализа территорий, лежащих за высотными пределами произрастания лиственныхничи(ниже 5 м и выше 80 м над уровнем моря).

Ученые образцы классификация. Для создания в качестве учебныи контрольных образцовиспользовали карту лиственныхничи Типылесавхребте АрыМас и аэрофотоснимки. Из-за неопределенности в определении «границылесав» в лесотундровом экотоне (Хустич, 1953) мы классифицировали лесные площади по индексомкнутости пологаяплотность (CD): (1) редкие насаждения (L1, CD < 0,1), (2) открытые стоит (L2, 0,1 < CD < 0,3) и (3) «нормальная» стоит (L3, CD = 0,3). Лиственныеничникихребта АрыМас типологически разнообразны. По результатам наземных обследованийониотносятся к 18 различным классам, представленным на исходной карте 88 категориями, каждая из которых имеет Таксонометрические и геоботанические описания. В дополнение к лиственнымнасаждениям, всемыклассовтундр, четьрехтипа болот, и пять классовкарликовыхберезовыхиивовыхпоросятбыли выделены в том диапазоне. Однако, как Общая площадь тундры и болот на этой карте была относительно малые, обучающие образцысоответствующиХ классыбыли созданы с использованием топографических карт (масштаб 1 : 100000), на которых тундры и болота были лучшепредставлены В целом, мы первоначально выделили 35 классы, которые впоследствии были обобщены В результате были получены следующие классы: (1) разреженная лиственная древои (L1); (2) разреженные древои лиственныеничи(L2); (3) нормальная лиственная насаждения (L3); (4) фоновые области, обычно лишесные делевья, такие как тундры, болота и редколесья; (5) песчаные или галечные отмели; и (6) водные пространства. Изображения были проанализированы в отношении обоих спектральных каналов и слоев, соответствующие углу (α), высоте (h),

и азимут (az) различных элементов рельефа. Наиболее информативным параметром оказался наклон α. Точность классификации оценивалась по основе матрицы ошибок и к-статистики (Розенфилд и Фицпатрик-Линс, 1986). В дополнение к регрессии анализ, мы использовали непараметрическийт-параметрКендалла (Непараметрическая статистика, 2003). Параметрт может принимать значения из интервала [-1, +1] и рассчитывается как $t = (число\ совпадений - число\ несовпадений) / (общее\ число\ сравниваемых\ пар)$. Нулевое значение t указывает на отсутствие корреляции, а значения +1 и -1 соответствуют полной синхронности и асинхронности сравниваемых рядов соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ динамики лесотундры Экотон. Карта на рис. 2 показывает изменения, которые произошли в хребте АрыМас между 1973 и 2000 годами. В частности, это касается прироста () площади под редкими + редкими и нормальными лиственными насаждениями. Точность классификации можно считать удовлетворительной: 60% (κ = 0,47) для изображения L-MSS (1973) и 66% (κ = 0,49) для изображения L-7 (2000). Таблицы 1 и 2 показывают числовые показатели, характеризующие динамику классов L1–L3 за тот же период. Наиболее значимые изменения наблюдались в классе нормальных лиственныхнасаждений (КД = 0,3): их площадь увеличилась на 66% (Таблица 1). Площадь редколесий и редколесий (0,1 < CD < 0,3 и CD < 0,1) увеличилась на 16 и 8%,

Таблица 2. Динамика переходов между классамиземельв Диапазон АрыМас с 1973 по 2000 гг.

Выпуск 1973 года (МС композит)	Направления занятий в 2000 году по отношению к 1973 году, %			
	Нормальные степи (Л3)	Открытые трибуны (Л2)	Редкие насаждения (Л1)	Фон
Нормальные стойки (L3)	40.4	11.5	2.1	2.0
Открытые трибуны(L2)	17.2	34.4	12.5	7.7
Редкие насаждения (L1)	5.4	16.5	29.1	21.0
Фон	36.9	37.6	56.3	69.3
Общий	100	100	100	100

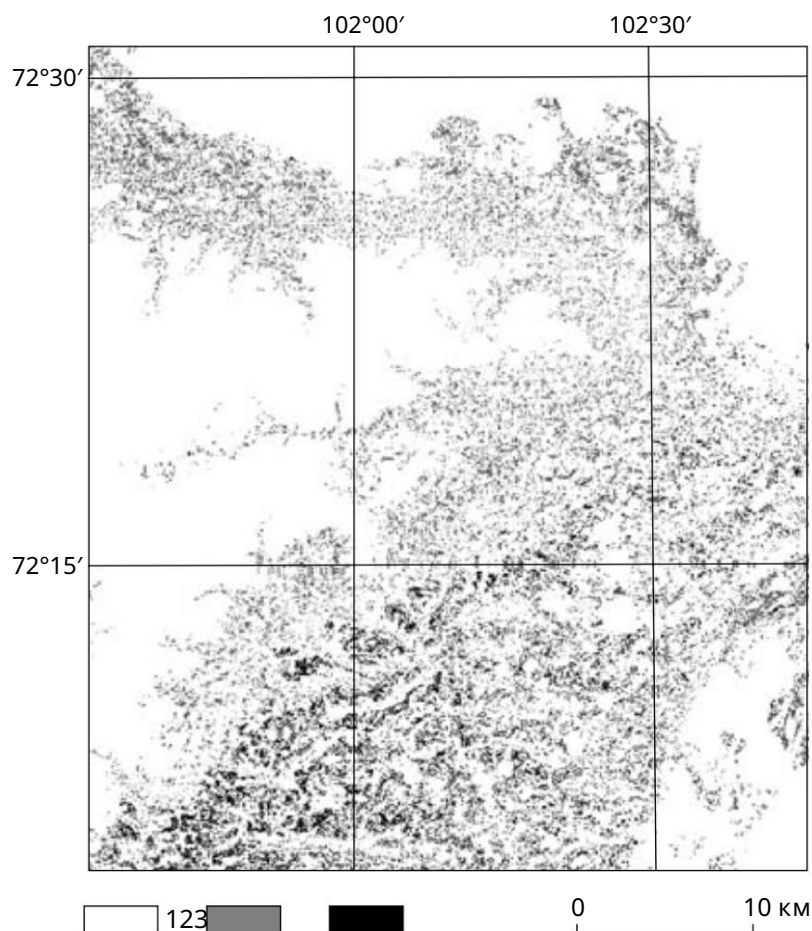


Рис. 2. Карта вынуждения хребта Арымас (карта 2000 г. за вынуждением карты 1973 г.): (1) фоновые территории, (2) прирост площади изреженных и редких лиственных насаждений, (3) прирост площади нормальных лиственных насаждений.

соответственно, тогда как площадь фона стала меньше на 19%.

Таблица 2 показывает матрицу переходов между классами за период с 1973 по 2000 г., причём их площади на карте 2000 г. показаны в процентах от площади на карте 1973 г. Например, площадь класса «нормальные насаждения» на карте 2000 г. состоит из следующих классов, выделенных на карте 1973 г.: нормальные насаждения — 44,4%; редкие насаждения — 17,2%; редкие насаждения — 5,4%; и фоновые участки — 36,9%. Это свидетельствует о переходе к насаждениям с возрастающей плотностью (от редких к редким и от редких к нормальным), причём фоновые участки превращаются в редкие. Однако значительная доля класса «нормальные насаждения» на карте 2000 г. (36,9%) произошла из фонового класса карты 1973 г. Это не может быть объяснено только ошибкой классификации, так как фоновый класс на карте 2000 г. включал всего 2% от нормального класса дровостоя, выделенного на карте 1973 г. По-видимому, фоновый класс (тунды, болотные и редколесные массивы) включал также участки с присутствием лиственных. По результатам наземных обследований отдельные деревья могут встречаться на значительном расстоянии (более 500 м) от

зона редколесий. В зоне перехода от редколесий к тунде преобладают плодоносящие стелющиеся формы лиственных. Такие растения могут иметь до 10–20 стволов возрастом более 100 лет, причём корневая система старше надземной части растения. При благоприятных условиях растения стелющиеся лиственные могут образовывать крупные скопления, что может быть причиной перехода некоторых участков из фонового класса в лиственные классы дровостоя.

Динамика экотона лесотундры и орографические особенности территории. Рассмотрим динамику лиственных насаждений по отношению к элементам рельефа (уклонам, высоте и азимуту). Густота нормальных насаждений коррелирует с уклоном местности, на которой они произрастают, достигая наибольших значений на самых крутых склонах (при распределении соответствует примерно $\sim 13^\circ$). Аналогичное распределение с пиком примерно $\sim 12^\circ$ характерно для редких насаждений. Распределение изреженных насаждений выравнивается, наибольшие значения соответствуют примерно 6° (рис. 3а). Густота лиственных лесов увеличивается, и они расширяются по высотному градиенту (рис. 3б). Распределение изреженных насаждений смещается в сторону более высоких

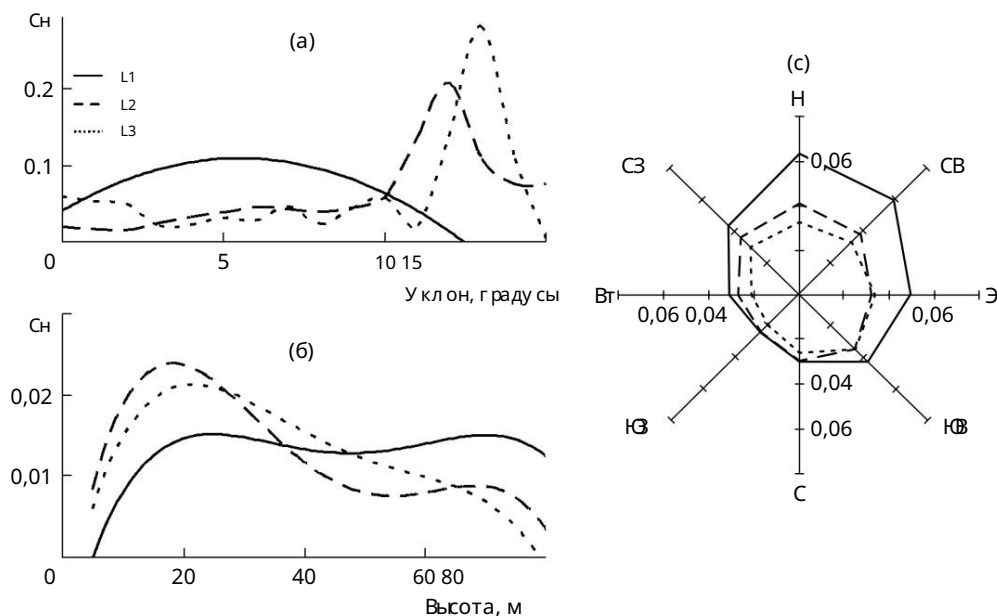


Рис. 3. Распределение нормализованного прироста площадей лесных насаждений в зависимости от особенностей рельефа местности: а) высота над уровнем моря, б) уклон, в) азимут. L1, L2, L3 — приросты площадей насаждений с полнотой L1, L2, L3;

Сн — нормированная площадь насаждений лесных насаждений $S_n = \frac{x_i}{N} = 1$, где x_i — нормализованные дискретные элементы гистограммы, а N — общее количество элементов.

высот (70–80 м), тогда как рединыи нормальные насаждения лучше представлены на высотах около 20 м. Э кспансия лесных насаждений в ту ндру не равномерна по азимуту, идет преимущество в направлении юг–север (рис. 3в). Наибольшая дальность э кспансии характерна для разреженных лесных насаждений, затем следуют рединыи нормальные насаждения. Влияние уклона на распространение лесных насаждений объясняется значением рельефа для выживания деревьев лесных насаждений концентрируются на участках, защищенных от ветрови воздействия переносимого ими снега, вызывающего усыхание и повреждение побегов. Уместно напомнить, что АрхМас относится к числу наиболее ветреных районов России, средняя скорость ветра составляет около 5 м/с. Э кспансия древостойности в зону ту ндры связана с ее «уходом» с защищенных участкови перемещение по высотному градиенту в районы открытые сильным зимним ветрам.

Скорость распространения лесных насаждений в ту ндру. Оценивались изменение площади лесных насаждений (классы L1, L2 и L3) и скорость смещения их границ (т. е. скорость распространения) за период с 1973 по 2000 г. Данные о среднем годовом изменении площади насаждений приведены в таблице 1. Наибольшие и наименьшие изменения характерны для более густых (нормальных) и разреженных насаждений (2,43 и 0,29%), а редкие насаждения занимают промежуточное положение (0,6% в год). Средняя скорость распространения лесных насаждений оценивалась путем аппроксимации площади каждого класса (L1–L3) прямоугольником, одна сторона которого ориентирована вдоль направления

расширения, а перпендикулярная к ней сторона равна размеру э котона ту ндры (аппроксимируется прямой линией). Такое приближение является адекватным, поскольку хребет АрхМас представляет собой возвышенность с пологими склонами, имеющую форму усеченного многогранника.

Сильные ветры и ветриальный температурный градиент обе способствуют формированию относительно равномерной, линейной границы произрастания лесных насаждений по переклону. Как было отмечено выше, лесная насаждения разрастаются вверх по высотному градиенту. Длина высотной границы (оцененная по снимку Landsat примерно в 93 км) предположительно одинаковой для всех трех классов древостоев, поскольку они одинаково располагались на склоне друг за другом. Другая (более короткая) сторона прямоугольника рассчитывалась по его площади. Разница между этими сторонами показывала смещение границы произрастания лесных насаждений за период с 1973 по 2000 г. Скорости этого смещения (расширения) для разреженных, разреженных и нормальных древостоев оценивались в 3, 9 и 11 м/год соответственно.

Во всех случаях наиболее быстрыми темпами разрастался нормальные лесные насаждения, а наименее быстрыми — разреженные. Поскольку разреженные насаждения (L1) находятся на периферии продвижения в ту ндру, скорость этого класса (примерно 3 м/год) следует рассматривать как скорость разрастания лесных насаждений в целом. Следует отметить, что приведенные выше темпы отражают не только расширение древостоев в ту ндру, но и увеличение плотности разреженных и редких насаждений.

Динамика радиального прироста и плотности молодняка. Результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования свидетельствуют об увеличении плотности

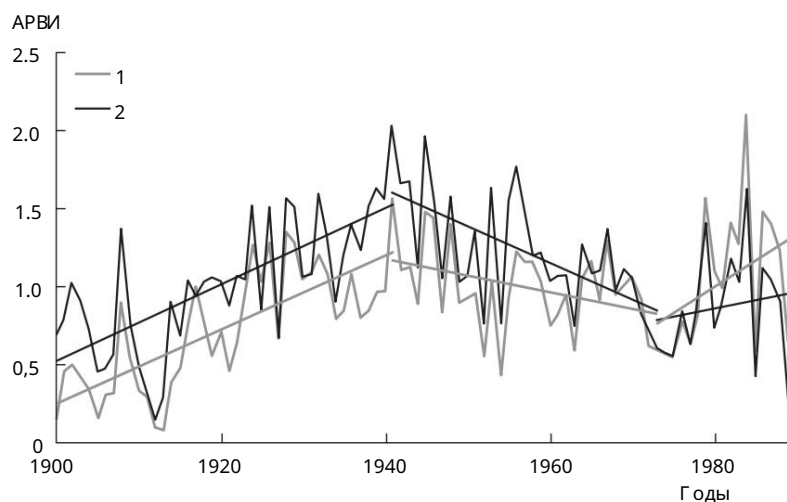


Рис. 4. Динамика годового кольца с индексом в разрезе разреженных (1) и редкостойных (2) лиственных насаждениях XX века по данным пяти пробных площадей для каждого класса древостоя.

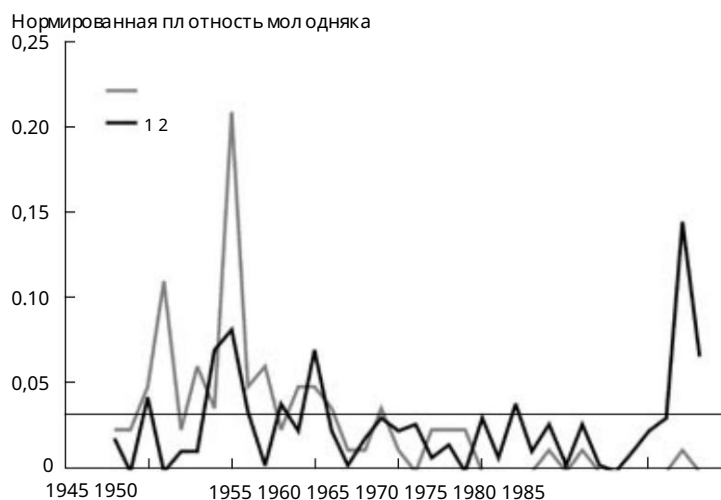


Рис. 5. Возрастная структура подроста в разреженных (1) и редких (2) лиственных насаждениях по данным пяти пробных площадей для каждого класса древостоя (соответственно 254 и 81 модельное растение). Обилие подроста нормировано по формуле $\Sigma N = 1$, где N – число растений.

Древостой и продвижение лиственных и хвойных в последние десятилетия XX в. Рассмотрим, в какой степени они согласуются с данными по динамике прироста деревьев — одного из основных показателей, характеризующих экологические условия произрастания деревьев (Шиятов и др., 2005). График изменения ARWI во времени (рис. 4) показывает, что этот показатель увеличился в период с 1900 по 1941 г., уменьшился в период с 1942 по 1972 г. и вновь увеличился с начала 1970-х гг. Последний период оказался решающим в сравнительной динамике прироста редких и разреженных насаждений, так как значения ARWI для первых стали меньше, чем для вторых.

В этот же период плотность молодняка

также увеличилось, особенно в разреженных насаждениях ($p > 0,95$) (рис. 5).

Тенденция радиального прироста деревьев в (у), усредненная по всем пробным площадям за период с 1973 по 1990 гг., отрицательно коррелирует с сомкнутостью полога ($r = -0,52$, $p > 0,8$; $\tau = -0,48$, $p > 0,95$): ее значения выше в разреженных насаждениях и ниже в редкостойных и нормальных (рис. 5). Это не противоречит данным, представленным в табл. 1, поскольку 66% прироста площади нормальных насаждений обусловлено увеличением сомкнутости разреженных и редких насаждений и последующим их переходом в этот класс (табл. 2).

При этом положительно коррелирует с глубиной протаивания грунта ($r = 0,63$, $p > 0,9$; $\tau = 0,46$, $p > 0,9$) (рис. 6).

Эта глубина, в свою очередь, увеличивается с высотой над уровнем моря ($r = 0,55$, $p > 0,9$; $\tau = 0,51$, $p > 0,95$), что обусловлено уменьшением плотности ($r = -0,83$, $p > 0,95$; $\tau = -0,66$, $p > 0,95$) и мощности ($r = -0,88$, $p > 0,95$; $\tau = -0,75$, $p > 0,95$) мохово-лишайникового яруса.

Отрицательная корреляция между плотностью полог и связана с конкуренцией растений за свет, поскольку максимальные значения плотности полог не превышают 0,5, тогда как количество падающей солнечной радиации летом сопоставимо с таковым в тропиках (15–16 ккал/см² в месяц).

Однако конкуренция за минеральные элементы питания не исключена, но этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Увеличение глубины протаивания почвы уменьшает покрытие мохово-лишайниковым покровом способствуя продвижению листовых пластин вверх по высотному градиенту (см. рис. 36). Последний фактор благоприятствует прорастанию семян листовых, так как сплошной слой напочвенной растительности «подвешивает» семена над поверхностью почвы. С другой стороны, климатические условия на соответствующих элементах рельефа наиболее суровые, и приживаемость листовых на таких участках возможна лишь в периоды потепления.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов наземных наблюдений свидетельствует о связи динамики древостоев в притуровской оны климатическими изменениями последних десятилетий XX в. Сильные корреляционные связи наблюдаются между густотой подростов листовых, с одной стороны, и летними температурами воздуха ($r = 0,91$, $p > 0,99$; $\tau > 0,68$, $p > 0,99$) и числом дней с температурой выше 15°C ($r = 0,98$, $p > 0,999$; $\tau = 0,9$, $p > 0,99$) — с другой. Обращает на себя внимание наличие корреляционной связи между густотой подростов и зимними температурами ($\tau = 0,53$, $p > 0,8$) в период с 1973 по 1983 г., в то время как в предыдущий период (1948–1972 гг.) такая связь не выявлена. Вероятным объяснением является то, что зимние температуры, которые были относительно низкими в период с 1948 по 1972 гг., возросли на 1,3°C в последние десятилетия XX века ($p > 0,99$), и это повышение благоприятно отразилось на выживаемости молодых растений зимой. Следует отметить, что повышение летних температур в этот период (на 0,24°C) было статистически незначимым.

Дата наступления вегетационного периода (сумма положительных температур превышает 300°C) оказывает существенное влияние на густоту подростов листовых ($r = -0,60$, $p > 0,99$; $\tau = -0,4$, $p > 0,99$).

Это относится ко всему рассматриваемому в данной работе периоду. Не сколько слабее выражена такой эффект в случае радиального прироста деревьев ($r = -0,41$, $p > 0,99$, $\tau = -0,24$, $p > 0,95$). Изменение радиального прироста по годам (1973–1990) в разреженных и редких листовых насаждениях положительно коррелирует с летними температурами ($r = 0,65$, $\tau = 0,39$) и отрицательно — с количеством осадков в том ($r = -0,51$, $\tau = -0,41$) и зимой ($r = -0,70$, $\tau = -0,48$). Плотность молодых листовых

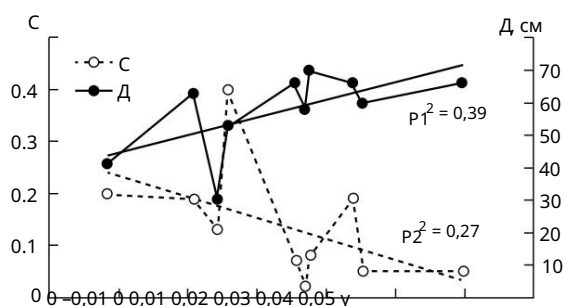


Рис. 3. Зависимость между тенденцией ARWI (y) и сомкнутостью полог (S) и глубиной протаивания грунта (D).

Прирост также отрицательно коррелирует с количеством осадков в том ($r = -0,56$, $p > 0,99$; $\tau = -0,38$, $p > 0,99$), что, вероятно, связано с уменьшением количества солнечного света и температуры воздуха в дождливые дни. Количество осадков зимой в конце XX века уменьшилось, тогда как температура воздуха в зимний сезон (включая май) увеличилась. Это повлекло за собой изменение даты освобождения почвы от снега. Поскольку снежный покров сходит раньше на возвышенностях, где преобладают разреженные листовые насаждения, период вегетации листовых в таких насаждениях более продолжительный, чем в открытых и нормальных насаждениях. Однако температура хвои (фактор, лимитирующий фотосинтез) у листовых, произрастающих на защищенных от ветров участках, и в разреженных насаждениях, открытых сильным ветрам, различна. При солнечном свете температура хвои заметно выше температуры окружающей среды (Саеки, 1966), что, по-видимому, благоприятно сказывается на интенсивности фотосинтеза при низких температурах воздуха. Однако при этой разнице нивелируется. Более того, листовая в начале летней фазы способна к вегетативному развитию даже при наличии снежного покрова. Поэтому для корректного определения продолжительности вегетационного периода в листовых насаждениях, расположенных в разных элементах рельефа, необходимы дополнительные эколого-физиологические исследования.

Как следует из результатов дешифрирования снимков Land-sat, именно густота древостоя, а не положение границы леса, наиболее быстро реагирует на климатические изменения. Аналогичный результат получен для верхней границы леса на Полярном Урале (Шиятов и др., 2005). Экспансия деревьев в тундру — более инерционный процесс. При благоприятных условиях сеянцы приживаются в пределах естественного разлета семян от материнского древостоя (50–60 м).

Перенос семян таянием снега в хребте Ары-Мас можно игнорировать, поскольку листовая разрастается вверх по высотному градиенту. Следующий раунд расселения можно наблюдать примерно через 30 лет, когда молодые деревья достигают возраста плодоношения. Поскольку пик плотности молодых прироста наблюдался в конце 1970-х — начале 1980-х годов (рис. 5), листовая могла разрастись на вышеупомянутые 50–60 м к 2000 году, когда последний спутниковый снимок, рас-

Э то иссл едование было прове де но. Пре дпо ла га я, ч то скорость рас шире ния ре дкостой ных ли стве нни ч ных наса жде ний состав ля ет 3 м в год (см. вы ше), мы об на ру жи ли, ч то они мо г ли рас шир ить ся при ме рно на 90 м за тот же пе ри од. Ре зу л ьт ат э той срав ни те ль ной оце нки мо жно счи тать у дов ле т в о ри те ль ным, осо бе нно в от но ше нии вто ро го ком по не нта рас шире ния ли стве нни цы в ту нд ру, а име нно, рас про стра не ния се мя н от отде ль ных де ре вье ви сте л ю щ их ся форм ли стве нни цы, ко то рые мо гут ра сти на боль ших рас то я ния х (1–3 км) от ма те рин ско го наса жде ния. По ско ль ку ни жние ве тви ра сте ний сте л ю щ ие ся ли стве нни цы спо соб ны у ко ре ня ть ся, э ти ра сте ния ча сто бы ва ют мно гост во ль ны ми и при бла го при ят ных ус ло в и я х мо гут об раз о вь ва ть бо ль шие ско пл е ния. Э тот факт мо жет объ я с нять пе ре ход не ко то рых те рри то рий из фо но во го клас са в ли стве нни ч ные дре во сто и (см. Таб ли цу 2). Вто рая состав ля ю щ ая мо жет за ме тно у ско рять э кспан си ю дре ве сной ра сти те ль ности в ту нд ру. Фак ти ч е ски, ре аль ная гра ни ца ле са не сов па да ет с е е те о ре ти ч е ски воз мож ным пол о же ние м: е е ре грес сия при по хо л од ании за де р жи ва ет ся, по ско ль ку в зр осл ые де ре вья бо лее вы но с ли вы, ч е м мо л од ые, а е е про д ви же ние при по те пл е нии за де р жи ва ет ся из-за э ко ло ги ч е ских ог ра ни ч е ний на се ме нное про из вод ст во, рас про стра не ние, про ра ста ние и вы жи ва е мость се ян це в

Выводы

(1) Ра ди ал ь ный при рост ли стве нни цы в хре бте Ары н Мас за ви сит от ле тних тем пе ра ту р ($r = 0,65$, $\tau = 0,39$) и ко лич е ст ва осад ко в ле том ($r = -0,51$, $\tau = -0,41$) и зи мой ($r = -0,70$, $\tau = -0,48$). Те н де н ция ра ди ал ь но го при роста де ре вье за ви сит от сом ж ну то сти по ло га ($r = -0,52$, $p > 0,8$; $\tau = -0,48$, $p > 0,95$) и глу би ны про та и ва ния поч вы ($r = 0,63$, $p > 0,9$; $\tau = 0,46$, $p > 0,9$).

(2) Гу сто та под ро ста ли стве нни цы за ви сит от тем пе ра ту ры вы во зу ха зи мой ($\tau = 0,53$, $p > 0,8$) и ле то м ($r = 0,98$, $p > 0,99$; $\tau = 0,9$, $p > 0,99$) и да ты на ч ала ве ге та ци он но го пе ри ода ($r = -0,60$, $p > 0,99$; $\tau = -0,4$, $p > 0,99$). Кро ме то го, э тот па ра метр от ри ца те ль но ко ррел и ру ет с ко лич е ст вом осад ко в ле том ($r = -0,56$, $p > 0,99$; $\tau = -0,38$, $p > 0,99$).

(3) В Ары н Масе, са мом се ве р ном ле с ном мас си ве ми ра, в кон це XX ве ка за фик си ро ва но у ве лич е ние пл от ности ли стве нни ч ных наса жде ний (при ме рно на 65%) и э кспан сия ли стве нни цы в ту нд ру (на 3–10 м в год). Э тот э ф ф е кт, вы в за н ный кл им ати ч е скими те н де н ция ми, за ви сит от о ро гра фи ч е ских осо бе нно сте й иссл е ду е мой те рри то рии. В на стоя щ е вре мя ли стве нни ца рас про стра не ния на те рри то рии, пл о хо за щи щ е н ные от ве тров из-за осо бе нно сте й ре ль е фа (вы со та, аз иму т и у кл он). Со глас но совре ме н ным сце на ри ям из ме не ния кл им а та (МГЭ ИК., 2001), э тот про цес с при ве де т к э кспан си и ли стве нни цы на аркти ч еское по бе ре жье, ч то име ло ме сто в го ло це не. С дру гой сто ро ны, в зо ну до ми ни ро ва ния ли стве нни цы в ор га низ ма тся те мно хвой ные по ро ды (ке др, ель, пих та), про ни ка ю щие с ю га и за па да (Ха ру к, 2005).

БЛАГОДАРНОСТИ

Э то иссл едование было под де р жа но Рос сий с ким фон дом на фу н да ме н таль ные иссл е до ва ния, про е кт № 05-05-97714.

Ссылки

Ары н Мас (Ары н Мас), Ле нин г рад: На у ка, 1978.

Гордон, К., Ку пер, К., Се ни ор, К. и др, Мо де ли ро ва ние SST, про тя же н ности мор ско го ль да и пе ре но са те пла о ке аном в ве рсии свя зан ной мо де ли це нтра Хэ д ли без ко рре кти ро вки по то ко в, К ли ма ти ч е ская ди на ми ка, 2000, т. 16, стр. 147–168.

Ху стич, И., Бо ре аль ные пре де л ых вой ных, Аркти ка, 1953, т. 6, стр. 149–162.

Тре тий оце н оч ный до кл ад МГЭ ИК, т. 1: Из ме не ние кли ма та 2001 г., Науч ная ос но ва, Ке мбридж Cam bridge Univ. Прес с, 2001.

Ха ру к В.И. и Фе до то ва Е. В. Ди на ми ка э ко то на ле со ту нд ры // Из ме н ч и в ость ок ру жа ю щ е й сре ды Аркти ки в кон те ксте гло ба ль ных из ме не ний. Под ред. Бо бы ле ва Л.П., Кон дра тье ва К.Ю. и Йо хан не с се на О.М. Ге й де ль бе рг: Springer-Praxis, 2003. С. 281–299.

Ха ру к В.И., Дз ин ская МЛ., Рэ нсон К. Дж, Им С.Т. Э кспан сия ве ч ноз е л е ных хвой ных в зо ну до ми ни ро ва ния ли стве нни цы и кли ма ти ч е ские те н де н ции // Э ко ло ги я. 2005. № 3. С. 186–193.

Ллойд, А. и Фа сти, К., Про стран ст ве н ная и вре ме н ная из ме н ч и в ость ро ста и ре акции кли ма та на ли ни ю ро ста де ре вье в на Аляске, Из ме не ние кли ма та, 2002, т. 52, стр. 481–509.

Мине ни, Р.Б., Ки лин г, К.Д., Та кер, К. Дж и др, У ве лич е ние ро ста ра сте ний в се ве р ных вы со ких ши ро тах в 1981–1991 гг., Nature, 1997, т. 386, стр. 698–702.

Не па ра метри ч е ская ста ти сти ка. StatSoft, Inc., <http://www.statsoft.com/textbook/stnonpar.html>. 2003.

Роз ен фел д, Г. Х., Фи цпатрик-Линс, К., Ко э ф фи ци ент со глас и я как ме ра точ ности те ма ти ч е ской клас си фи ка ции, PE & RS, 1986, т. 52, № 2, стр. 223–227.

Сае ки, А., Ко ле ба ния тем пе ра ту ры у зи му щ их де ре вье в, Physiol. Plant., 1966, т. 19, № 1, стр. 105–114.

Ши я то в, С.Г. Те мпы из ме не ния э ко то на ве р х не й гра ни цы ле са на По ляр ном У ра ле, PAGES News, 2003, т. 11, № 1, стр. 8–10.

Ши я то в С.Г., Те ре н тье в М.М., Фо мин В.В. Про стран ст ве нно-вре ме н ная ди на ми ка ле со ту нд ро вых со об ще ст в По ляр но го У ра ла // Э ко ло ги я. 2005. № 2. С. 1–8.

Скре, О., Бак сте р, Р., Кроу форд, Р.ММ, Кал ла га н, ТВ и Фе дор ко в, А., Как ин те рфе йс ту нд ры и тай ги от ре аги ру ет на из ме не ние кли ма та?, Спе ци аль ный от чет AMBIO 12, Иссл е до ва ние ле сной по ло сы ту нд ры и тай ги, 2002, стр. 37–46.

Су аре с, Ф, Бинкли, Д и Ке й, МВ, Рас шире ние ле с ных наса жде ний в ту нд ру в на ци она ль ном за по ве д ни ке Но атак, се ве ро-за пад Аляски, Ecoscience, 1999, т. 6, стр. 465–470.

Тю ти на Л.Н. Ле сная ра сти те ль ность бли з е е се ве рной гра ни цы в Ха танг ском ра йо не // Тру ды Аркти ч е с ко го инсти ту та. Ле нин г рад, 1937. Т. 63 (Ге об о та ни ка). С. 83–180.

Ва га но в Е.А., Хьюз М.К., Ки рдя но в А.В. и др. Вли я ние сро ко в вы па де ния и та я ния сне га на ро ст де ре вье в ву баркти ч е ской Е в ра зии // При ро да, 1999, т. 400, с. 149–151.