

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### КЛИМАТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКОТОНЕ АЛЬПИЙСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ ПЛАТО ПУТОРАНА

© 2013 г. С. Т. Им\*, В. И. Харук

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

*\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

Исследована пространственно-временная динамика экотона горной лесотундры плато Путорана за последние 36 лет на основе космических съемок Landsat (1973, 2009 гг.), Hexagon (1976 г.), Quickbird (2005 г.) и Terra MODIS (2002–2009 гг.). Выделены три основные категории наземного покрова: редколесья с сомкнутостью  $>0.2$ ; редины с сомкнутостью  $<0.2$  и кустарники; фоновые территории. Площадь редколесий увеличилась на 60%. Этому способствовало увеличение сомкнутости в реди-нах. Наблюдаемое явление в основном отмечено вдоль долины реки. В зонах роста сомкнутости наблюдается увеличение вегетационного индекса NDVI на 0.14. Рост среднегодовой температуры в течение трех деkad конца 20 в. способствовал продвижению древесной растительности по высоте не более чем на 15 м над уровнем моря, и появлению трех новых деревьев на гектар. С ростом высоты над уровнем моря деревья предпочитают локальные депрессии на юго-восточных склонах с крутиз-ной до 30°.

**Ключевые слова:** плато Путорана, динамика экотона лесотундры, Landsat, Quickbird, MODIS, Hexa-  
gon, NDVI

**DOI:** 10.7868/S0205961413040052

#### ВВЕДЕНИЕ

Климатические модели предсказывают рост температур в Северном полушарии (IPCC, 2007). Отклик древесной растительности на изменения климата наиболее выражен в зонах, где температура лимитирует их рост (Holtmeier, 2009; ASIA, 2005).

Предполагается, что предсказываемое потепление приведет к продвижению древесной растительности как на север, так и по высоте над уровнем моря (ASIA, 2005). Последние исследования указывают на рост сомкнутости древостоев в экотонах горной лесотундры и расширение зон обитания древесной растительности в последние десятилетия 20 в. на севере Канады (Szeicz, Macdonald, 1995; Danby, Hik, 2007), в Северной Америке (Munroe, 2003; Lloyd, Fastie, 2003), в Шведских Скандиях (Kullman, 2002, 2005; Kullman, Oberg, 2009), в России (Esper, Schweingruber, 2004; Shiyatov et al., 2005, 2007; Kharuk et al., 2006, 2010; Macdonald et al., 2008), в Финляндии (Middleton et al., 2008), в горах Китая (Zhang et al., 2009).

Дистанционное зондирование (ДЗ) позволяет проводить анализ динамики растительного покрова для труднодоступных районов, где полевые работы сильно затруднены или невозможны. Ряд исследователей использовали аэрокосмические снимки для анализа динамики экотона лесотундры. Напри-

мер, Миддлтон и др. (Middleton et al., 2008) проанализировали аэрофотографии гор Финской Лапландии. Они обнаружили рост сомкнутости древостоев и продвижение деревьев по высоте над уровнем моря: ели – на 100 м и березы – на 40–60 м в течение 1947–2003 гг.

Мазек (Masek, 2001), проанализировав изменения вегетационного индекса NDVI в экотоне Северной Канады за период 1974–1999 гг. на основе съемки Landsat, заключил, что граница древостоев является стабильной либо изменения произошли в пределах пространственного разрешения съемки Landsat (менее чем 2–3 м/год).

Жанг и др. (Zhang et al., 2009) исследовал динамику экотона горной лесотундры в горах Чангбай (Китай) на основе съемки Landsat. Они не нашли очевидных изменений в положении границы леса. Но наблюдали значительный рост вегетационного индекса NDVI на 0.1–0.3 в течение 1977–1999 гг. Рост NDVI был обусловлен увеличением сомкнутости, что подтвердили полевые исследования (сомкнутость увеличилась на 35%).

Анализ аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения за 1947–1989 гг. позволил Данби и Хику (Danby, Hik, 2007) сделать количественные оценки изменений, произошедшие в экотоне лесотундры на юго-западе Юкона (Канада). Обнаружен значимый рост площади покрытой елью. За

40-летний период в еловых древостоях появились  $9 \pm 3$  молодых дерева на га. В среднем количество возросло с 21 до 30 деревьев на га.

Олтоф и Пуолиот (Olthof, Pouliot, 2010) исследовали динамику AVHRR-NDVI за 1985–2006 гг. на территории Северной Канады. Обнаружили экспансию хвойных деревьев и кустарников в зону тундры.

Шиятов и др. (Shiyatov et al., 2005) проанализировали аэрофотографии на Полярный Урал. Установили, что в период 1910–1960 гг. площадь редколесья увеличилась в 10 раз и к 2000 г. — еще в 2 раза.

Также орография местности важна для выживания и роста деревьев в суровых условиях экотона (Holtmeier, 2009; Kullman, Oberg, 2009). В настоящее время доступны цифровые модели рельефа SRTM (Farr et al., 2007) и AsterGDEM (<http://demex.cr.usgs.gov>), которые могут быть использованы для анализа связи изменений в экотоне лесотундры с элементами рельефа местности (Kharuk et al., 2010).

Исследований по изменению экотона горной лесотундры в России немного (Shiyatov et al., 2005, 2007; Knorre, 2006; Devi et al., 2008; Kharuk et al., 2006, 2010).

Цель данной работы заключалась в анализе изменения границы лиственных древостоев в горах плато Путорана, чтобы найти ответы на вопросы: 1) как повлияло изменение климата за последние 40 лет на положение границы леса и сомкнутость древостоев в горах плато Путорана? 2) как связаны изменения положения границы леса и рост сомкнутости древостоев с топографией местности?

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

### *Объект исследования*

Площадь плато Путорана составляет 218 000 км<sup>2</sup>. Основная часть плато расположена в подзоне северной тайги на стыке Западной и Восточной Сибири (Гвоздецкий, 1968). Обширность Путорана определяет большое разнообразие растительного покрова. Выделяют четыре высотных пояса: лесной, субальпийский, альпийский и каменистые пустыни (Куваев, 1961).

В южной части плато лесами покрыто 60–70% территории. Остальная часть в основном представлена субальпийской и альпийской тундрами. Незначительная часть покрыта каменистыми тундрами. Альпийская растительность широко распространена по водоразделам. Лес приурочен к долинам рек и озер.

На юго-западе плато граница леса достигает 600–700 м над у.м., в северо-западной части — 200–400 м. В восточной части, где климат более

континентален, граница леса достигает 750–800 м на юге и 500–550 м на севере. На сухих южных склонах деревья распространяются еще выше. В местах аллювиальных залежей, скал и каменистой почвы граница леса расположена значительно ниже (на 100 м), чем климатическая граница.

Лесная растительность избирательна к местам обитания. Растения зависят от состояния окружающей среды и ветров. Деревья располагаются в низинах (Пармузин, 1964).

Преобладающей породой является лиственница Гмелина. Высота деревьев составляет 10–15 м (максимум 25 м), dbh = 10–15 см (редко 30–40 см) (Флора Путорана, 1976). Максимальный возраст деревьев 350–400 лет. Возобновление редкое. В западной части плато леса сформированы чистой лиственницей, либо с примесью березы и ели; в восточной — только лиственницей (Пармузин, 1964).

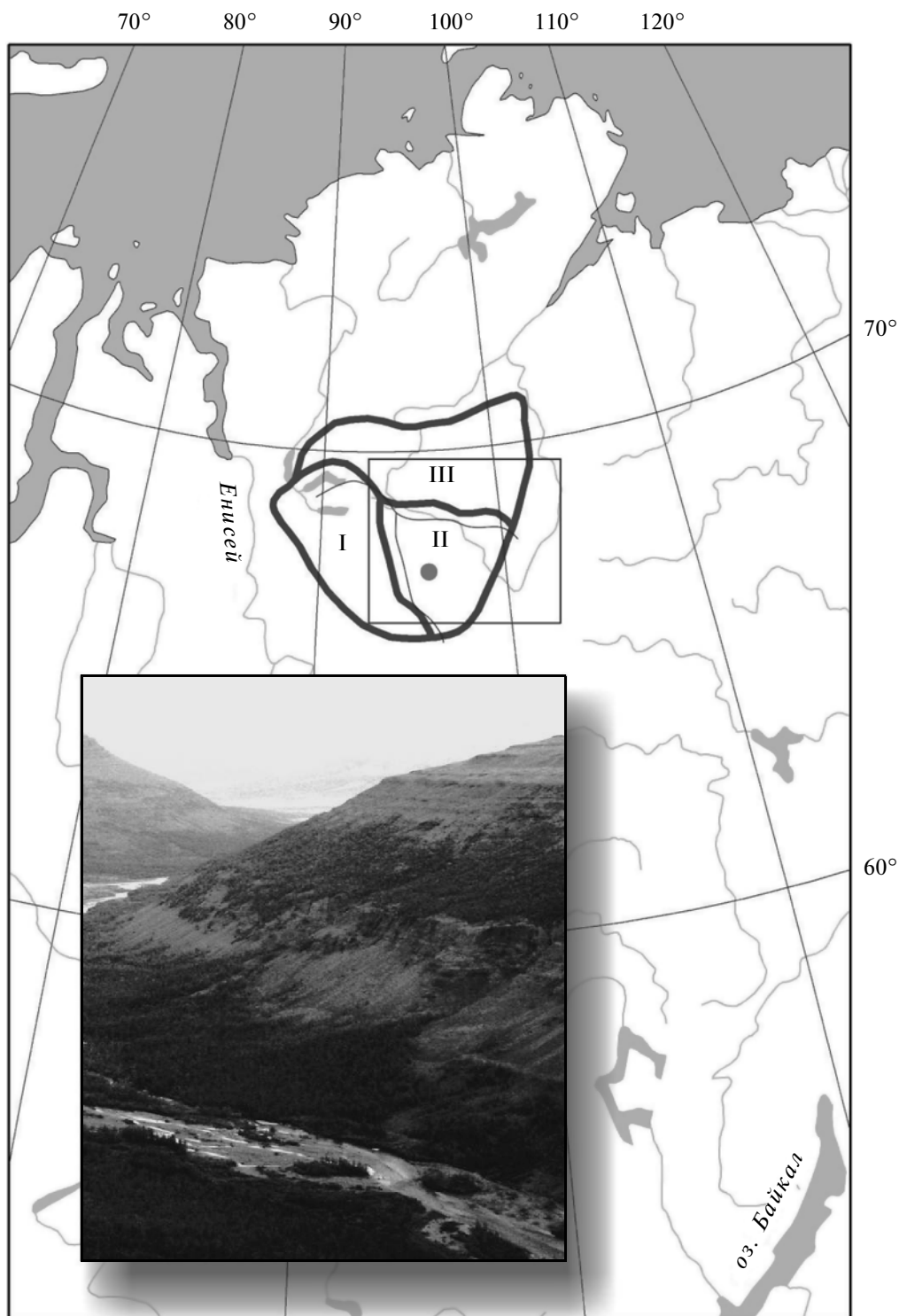
Леса западной и юго-западной частей плато характеризуются высокой сомкнутостью (0.3–0.6). В восточной части доминируют редколесья (сомкнутостью 0.2–0.3).

В субальпийской зоне граница леса определяется расположением редин. Некоторые лиственницы стланиковой формы с флаговой формой кроны произрастают в зоне альпийской тундры.

Редины состоят только из лиственницы Гмелина. Высота деревьев составляет 2–8 м, dbh = 5–16 см (изредка тоньше), деревья приземистые (Флора Путорана, 1976). Редины расположены на вершинах базальтовых террас, на холмах древних аллювиальных террас, на крутых склонах, часто среди аллювиальных отложений. На склонах средней крутизны редины и кустарники формируют два различных пояса, идущих последовательно. На крутых склонах расположены кустарники с примесью деревьев лиственницы. С увеличением высоты они замещаются ольховниками. Пояс ольховников четко выделяется в западной части плато и прерывается в восточной части Путорана.

Альпийский пояс начинается с 750–800 м над у.м. в южной части плато и на 400–600 м — в северной. В основном он покрыт тундровой растительностью. Есть одиночные кустарники. На подветренных склонах кустарники объединяются в компактные группы. Пояс каменистых тундр расположен выше, чем 1350–1400 м над у.м. В нем преобладает лишайник.

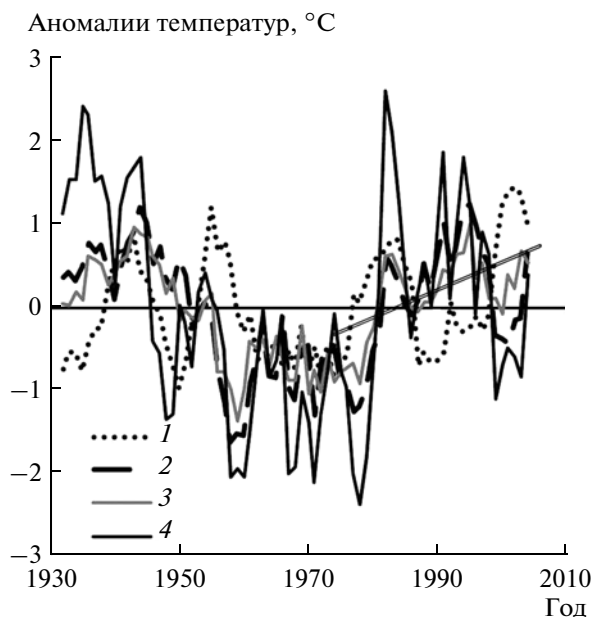
Объект исследования расположен в центральной части плато Путорана (68°19' с.ш., 94°33' в.д.). Площадь анализируемого участка составила 193 км<sup>2</sup>. Он характеризуется большим перепадом высот — от 465 до 1410 м (рис. 1). В соответствии с геоботаническим районированием (Флора Путорана, 1976) расположен исследуемый участок в восточной части северной тайги. Леса в основном



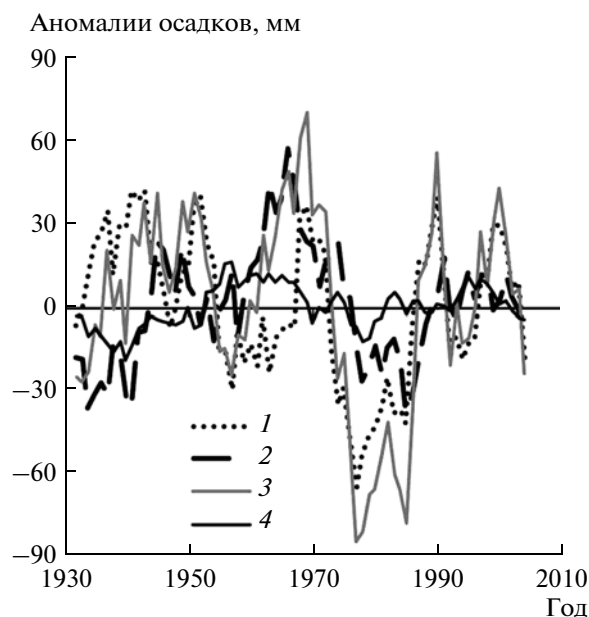
**Рис. 1.** Объект исследования и фото типичного ландшафта плато Путорана на исследуемой территории (ист: Google Maps, Panoramia). Геоботанические районы: I – западная подзона северной тайги; II – восточная подзона северной тайги; III – субарктическая зона. Кружком показан район основных исследований, прямоугольником – зона покрытия снимками Terra/MODIS.

сформированы рединами лиственницы Гмелина с сомкнутостью 0.3). Граница леса достигает 750–800 м над у.м. В кустарничково-травяном ярусе

доминируют *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre*, *Empetrum nigrum s. l.* Лишайники произрастают на всех участках.



**Рис. 2.** Аномалии среднегодовых температур (усредненные пятилетним окном): 1 – летние (июнь–август); 2 – “холодного периода” (сентябрь–май); 3 – годовые; 4 – зимние (декабрь–февраль).



**Рис. 3.** Аномалии суммарных осадков (усредненные пятилетним окном): 1 – летние (июнь–август); 2 – “холодного периода” (сентябрь–май); 3 – годовые; 4 – зимние (декабрь–февраль).

Климат является сурово-континентальным: в период 1976–2005 гг. среднегодовая температура составляла  $\text{минус } 14 \pm 1^\circ\text{C}$  (рис. 2), средние зимние (декабрь–февраль) температуры –  $\text{минус } 35 \pm 3^\circ\text{C}$ , средние летние (июнь–август) температуры –  $\text{плюс } 8 \pm 1^\circ\text{C}$ ; средняя температура “холодного периода” (сентябрь–май) –  $\text{минус } 21 \pm 1^\circ\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков равно  $440 \pm 75$  мм (рис. 3). В период сентябрь–май выпадает  $250 \pm 35$  мм, в летний период –  $188 \pm 53$  мм (Mitchell, Jones, 2005). В зимнее время плоские вершины слегка покрыты, либо не имеют снежного покрова, тогда как подветренные трапы аккумулируют снег, где высота снежного покрова может достигать нескольких метров (Румянцев, 1976). Преобладающая порода – лиственница Гмелина. Верхняя граница леса представлена стланиковыми формами и расположена на высотах 750–800 м (Флора Путорана, 1976). Исследуемая территория плато Путорана находится в списке мирового наследия UNESCO как полный набор субарктических и арктических экосистем в изолированном горном массиве, включая тайгу, экотон лесотундры, тундру и арктические пустыни, а также нетронутые озерные и речные системы (UNESCO, <http://whc.unesco.org/en/list/1234>).

### Материалы

Исследование проводилось на основе анализа временного ряда космических снимков, цифровой модели рельефа и топографических карт. Исполь-

зовались снимки Landsat-1/MSS (15.08.1973 г.) и Landsat-5/TM (10.07.2009 г.) с пространственным разрешением 60 и 30 м соответственно. Также использованы снимки Hexagon (19.07.1976 г., пространственное разрешение 6 м; <http://edcsns17.cr.usgs.gov>) и Quickbird (31.07.2005 г., пространственное разрешение 0.6 м; <http://maps.google.com>). Hexagon является американским военным спутником, работавшим в 1970-е годы (Richelson, 2001; Surazakov, Aizen, 2010). Для анализа динамики состояния растительного покрова использованы данные MODIS (144 снимка, продукт MYD13Q1, пространственное разрешение 250 м, 2002–2009 гг.). Данный продукт MODIS представляет 16-дневные композиты вегетационных индексов NDVI и EVI (<http://glovis.usgs.gov>).

Для анализа связи изменений в экотоне лесотундры с топографией местности использована цифровая модель рельефа (ЦМР) Aster GDEM (пространственное разрешение 30 м, разрешение по высоте 14 м; <http://demex.cr.usgs.gov>). Aster GDEM была проверена и уточнена по данным топографических карт М 1 : 200000 (по состоянию на 1973–1976 гг.).

Помимо указанных материалов в анализе использованы 20 наземных фотографий в качестве опорных данных для генерации классификационных картосхем. Фотографии получены из Google Maps Panoramia.

Данные по климату извлечены из набора CRU TS3.1 (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru>, <http://>



Рис. 4. Аномалии гидротермического индекса (усредненные пятилетним окном): 1 – годовые; 2 – летние (июнь–август); 3 – “холодного периода” (сентябрь–май).

www.knmi.nl). Набор данных CRU TS3.1 состоит из сеточных помесечных данных о температурах и осадках за период 1901–2009 гг. с пространственным разрешением  $0.5^\circ$  (рис. 2–4) (Mitchell, Jones, 2005).

Данные ДЗ анализировались с помощью программного пакета ERDAS Imagine. Статистический анализ проводился средствами Microsoft Excel.

## МЕТОДИКА

### Анализ снимков Landsat

Снимок Landsat-MSS (1973 г.) был привязан к снимку Landsat-TM (2009 г.). К снимкам применена топографическая нормализация методом С-коррекции для уменьшения вариации яркостей из-за неравномерного освещения склонов Солнцем (Riano et al., 2003). Затем рассчитан вегетационный индекс NDVI для 1973 и 2009 гг. Значения NDVI 1973 г. прокалиброваны к значениям NDVI 2009 г. для уменьшения различий в параметрах съемочной аппаратуры. Для этого, по участкам со стабильными значениями NDVI (например, каменистые и глубоководные поверхности), получена регрессионная зависимость ( $R^2 = 0.75$ )

$$NDVI_{1973} = 0.896 NDVI_{2009} + 0.117,$$

которая далее была использована для калибровки.

Классификационные картосхемы сгенерированы методом максимального правдоподобия. Обучающие выборки составлялись на основе сцен Quickbird, наземным фотографиям и эксперт-

ным знаниям. Всего сформированы 18 выборок (в среднем по 45 пикселей на выборку) для Landsat-MSS и 34 выборки (в среднем по 48 пикселей на выборку) для Landsat-TM.

Для выделения классов древостоев нами использован тот же критерий расстояний, который использовался Шиятовым и др. в исследованиях Полярного Урала (Shiyatov et al., 2007). Шиятов и др. сомкнутыми древостоями считали группы деревьев с расстоянием между ними не более 7 м, низкосомкнутыми – группы с деревьями, стоящими друг от друга на расстоянии более 7 м. Однако в нашем случае кроны деревьев имели меньше 3 м, и соответственно сомкнутость для групп с деревьями, расположенными на расстоянии 7 м, меньше и соответствует 0.1–0.25. В итоге выделено пять классов наземной поверхности: 1) редколесья с сомкнутостью  $>0.2$ ; 2) редины с сомкнутостью  $<0.2$  и кустарники; 3) тундры; 4) минерализованные поверхности; 5) водные поверхности.

Точность классификаций по методу каппа-статистики соответствует удовлетворительному уровню ( $\kappa_{1973} = 0.61$ ,  $\kappa_{2009} = 0.62$ ).

### Анализ снимков Hexagon и Quickbird

Снимок Hexagon был привязан к снимку Quickbird методом резиновой поверхности (использовано 6605 точек привязки, ERDAS, 2010). Известно, что пространственное слияние панхроматического снимка высокого разрешения с многоспектральным снимком низкого разрешения может существенно увеличить точность классификации (Phol, Genderen, 1998). Нами применен метод главных компонент для пространственного слияния снимков Hexagon (1976 г.) и Landsat-MSS (1973 г.). Метод главных компонент сохраняет высокое пространственное разрешение из панхроматического снимка и добавляет псевдо-спектральные характеристики из многоспектрального (Phol, Genderen, 1998; Welch, Ehlers, 1987; ERDAS, 2010). Далее были применены несколько масок для устранения из анализа следующих фоновых участков: 1) водные поверхности; 2) глубокие тени; 3) участки, расположенные значительно выше границы леса ( $>930$  м над уровнем моря; определено экспертно по цифровой модели рельефа и снимку Quickbird). Снимок Quickbird преобразован к пространственному разрешению снимка Hexagon (6 м) методом билинейной интерполяции. Для классификации использован метод кластеризации ISODATA вместо метода максимального правдоподобия – из-за сложности формирования мелко-контурных обучающих выборок для деревьев. Кластеризация сделана с разбиением на 200 классов с пороговым параметром равным 0.99. Идентифицировано четыре класса: 1) редколесья с сомкнутостью  $>0.2$  (*Lrch\_s*); 2) редины с сомкнутостью  $<0.2$  и кустарники

**Таблица 1.** Оценка точности классификаций Hexagon + MSS и Quickbird

Класс	Опорные данные				Ошибка пропуска, %	Ошибка включения, %	Каппа
	<i>Lrch_s</i>	<i>Lrch_vs</i>	<i>Lchn</i>	<i>Tndr</i>			
<i>Lrch_s</i>	132/154	16/6	0/0	0/0	9/3	11/4	0.86/0.95
<i>Lrch_vs</i>	13/4	65/97	0/0	5/0	38/11	22/4	0.74/0.95
<i>Lchn</i>	0/0	0/0	47/51	20/3	10/2	30/6	0.67/0.94
<i>Tndr</i>	0/0	23/6	5/1	285/285	8/1	9/2	0.82/0.95
Общая точность классификации, %						87/97	
Общая каппа-статистика						0.79/0.95	

В колонках: Hexagon + MSS (1976)/Quickbird (2005).

(*Lrch\_vs*); 3) лишайниковая тундра (*Lchn*); 4) каменистая тундра (*Tndr*). Точность классификации оценена методом каппа-статистики (табл. 1).

### Анализ топографии

Исследована связь изменений в распределении растительного покрова с элементами рельефа (высотой над уровнем моря, азимутальным направлением и крутизной склонов). Предварительно цифровая модель рельефа Aster GDEM была отфильтрована от артефактов. Выделены высотные срезы по 50 м и 100 м (с 400 до 930 м над у.м.). Диапазон азимутов направлений склонов был разбит на 16 групп по 22.5°: северный (С, 348.75°–11.25°), северо-северо-восточный (ССВ, 11.25°–33.75°) и т.д. Крутизна склонов была разбита по одному градусу.

Распределение элементов рельефа с заданными высотами, азимутальным направлением и крутизной является неоднородным и поэтому может привести к невозможности проведения сравнительного анализа. Чтобы убрать неоднородность, данные были нормализованы методом, описанным в предыдущих работах (Khaгuk et al., 2006, 2010). Для нормализации покрытые участки леса с заданными азимутальным направлением и крутизной склона и высотой соотносились со всей анализируемой территорией с идентичными параметрами

$$K_{c(i)} = A_{c(i)}/B_{c(i)},$$

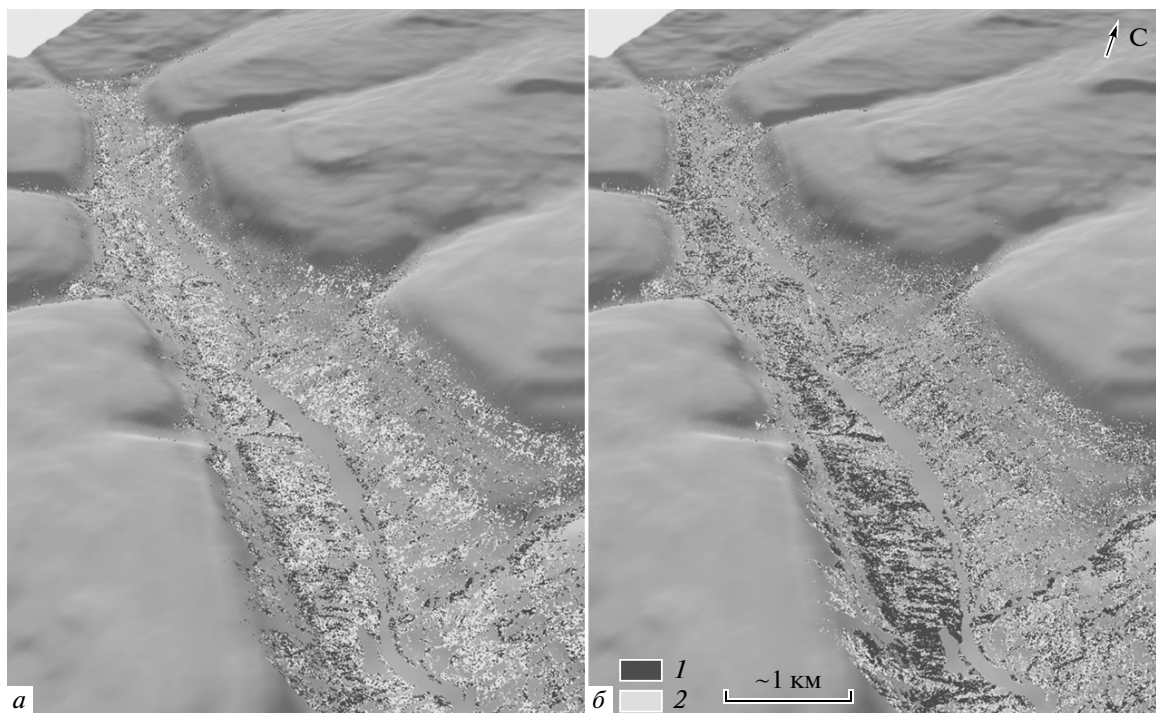
где  $c(i)$  – индекс, соответствующей  $i$ -й категории элемента рельефа  $c$  (высота над у.м., азимутальное направление и крутизна склона);  $K_{c(i)}$  – нормализованная площадь для данного класса наземной поверхности для  $i$ -й категории элемента рельефа  $c$ ;  $A_{c(i)}$  – абсолютная площадь данного класса наземной поверхности для  $i$ -й категории элемента рельефа  $c$ ;  $B_{c(i)}$  – абсолютная площадь данной поверхности для  $i$ -й категории элемента рельефа  $c$  на всей территории исследования.

Построены диаграммы распределения классов наземного покрова по различным элементам рельефа для различных высотных срезов.

Прямые измерения скорости распространения деревьев по градиенту высоты сильно затруднены из-за малых значений измеряемых величин. Поэтому скорость распространения деревьев по градиенту высоты оценивалась косвенно. Алгоритм расчетов был следующим. Известно, что с ростом высоты над у.м. количество пикселей, соответствующих классам лиственничников, уменьшается. На первом шаге создана таблица, в которую были выписаны все значения высот и соответствующие им количества пикселей лиственничников. Далее в таблице происходил поиск значений высот, начиная с наибольшей высоты, который соответствовало критическое количество пикселей лиственничников (100 = 0.36 га, 200 и 300 пикселей). Далее рассчитывалась разность между значениями найденных высот для 2005 г. и 1976 г. Например, по критерию 100 пикселей для классификации 2005 г. (Quickbird) найдена максимальная высота в 858 м над у.м., а для 1976 г. (Hexagon + MSS) соответствующая высота равна 841 м над у.м. Разность составляет 17 м, что соответствует 0.6 м/год.

### Анализ данных Terra/MODIS

Проанализирована динамика индекса NDVI по данным Terra/MODIS. Из имеющегося набора слоев NDVI за 2002–2009 гг. синтезированы изображения с максимальными значениями NDVI за летний период для каждого года, которые далее объединялись в композит. Для каждого пикселя композитного изображения NDVI вычислены линейные тренды и рассчитаны значимости коэффициентов. Слой значимых коэффициентов наклонов линий трендов использовался для обнаружения зон со статистически значимым ростом или падением индекса NDVI в течение 2002–2009 гг.



**Рис. 5.** Перспективное отображение классификационных картосхем исследуемой территории: *a* – 1976 г.; *б* – 2005 г., где: 1 – лиственные редколесья; 2 – лиственные редины и кустарники.

#### Анализ климатических данных

На исследуемую территорию проанализированы динамики температур, осадков и гидротермического индекса. Построены диаграммы и вычислены периоды со статистически достоверными трендами. Дополнительно использовался гидротермический индекс, который вычислялся как соотношение количества осадков в мм к суммарным температурам в К за анализируемый период. Выявлены косвенные связи между динамикой климата и изменениями в растительном покрове.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Пространственно-временные изменения в растительном покрове

Точность сгенерированных классификационных картосхем соответствует высокому уровню

( $\kappa_{1976} = 0.79$ ,  $\kappa_{2005} = 0.95$ , табл. 1, рис. 5). Из картосхем вычислены изменения площадей классов и матрица переходов классов (табл. 2, 3).

Построена диаграмма изменения площадей классов (рис. 6, 7). Площади были нормализованы методом, описанным выше. Ошибки площадей оценены по вычисленным ошибкам пропуска и включения для соответствующих классификаций (табл. 1). Например, пусть площадь редколесий для 2005 г. равна  $A$ , при этом ошибка пропуска равна 3% и ошибка включения равна 4% (табл. 1). А для 1976 г. площадь редколесий равна  $B$ , при этом ошибка пропуска равна 9% и ошибка включения равна 11% (табл. 1). Тогда разность  $C = A - B$  и ее оценочные границы будут [ $C - C(0.04 + 0.11)$ ;  $C + C(0.03 + 0.09)$ ].

Анализ съемок Landsat 1973 и 2009 гг. показал прирост площади редколесий в 40% за 37 лет. То-

**Таблица 2.** Изменения площадей классов за период 1976–2005 гг.

Класс	Площадь, га		Разность (2005–1976 гг.)	
	1976	2005	Площадь, га	% от 1976 г.
<i>Lrch_s</i>	348.5	562.5	214.0	61
<i>Lrch_vs</i>	707.3	609.7	–97.6	–14
<i>Lchn</i>	296.8	363.3	66.5	22
<i>Tndr</i>	1586.6	1403.8	–182.9	–12

**Таблица 3.** Матрица трансформации классов за период 1976–2005 гг.

Классы с картосхемы 2005 г.	Классы с картосхемы 1976 г. Площадь, га			
	<i>Lrch_s</i>	<i>Lrch_vs</i>	<i>Lchn</i>	<i>Tndr</i>
<i>Lrch_s</i>	242.0	314.7	5.8	0.0
<i>Lrch_vs</i>	105.4	267.2	16.9	220.2
<i>Lchn</i>	1.1	3.6	140.6	218.0
<i>Tndr</i>	0.0	121.8	133.5	1148.4

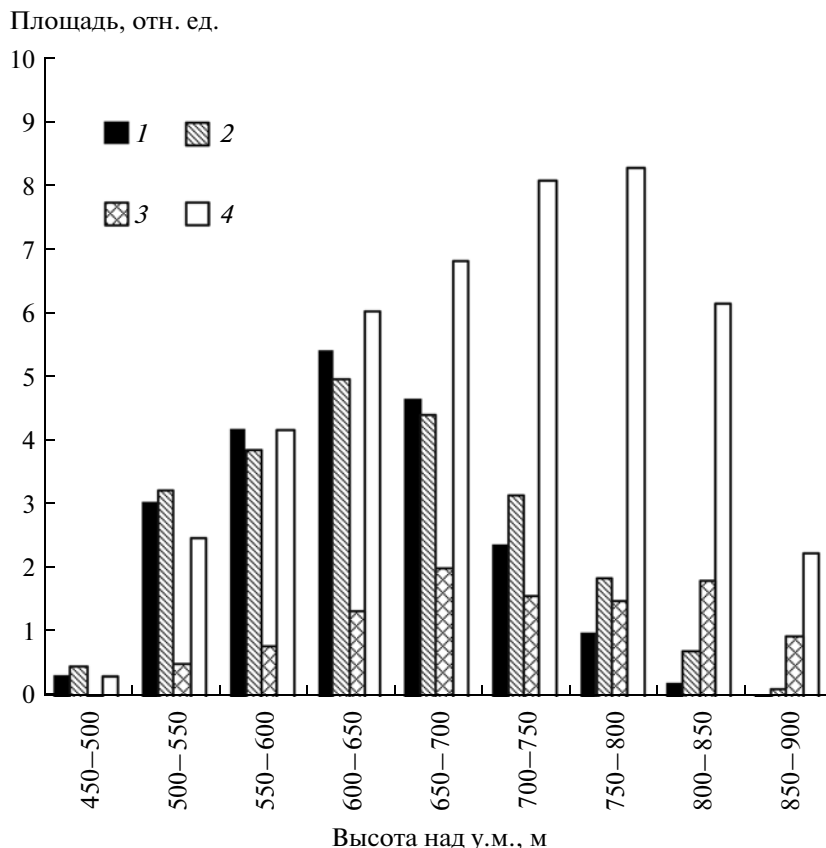
гда как анализ Hexagon + MSS (1976 г.) и Quickbird (2005 г.) указывает на 60% рост площади в течение 30 лет.

казано распределение разности в площадях классов между 2005 и 1976 гг.

*Связь динамики растительного покрова с элементами рельефа*

Оценены изменения классов наземного покрова в зависимости от высоты над у.м., азимутальным направлением и крутизны склонов. Вычислено распределение площадей классов по высотному градиенту. На рис. 6 представлено распределение площадей для 1976 г. На рис. 7 по-

За период 1976–2005 гг. площадь лиственных редколесий увеличилась на 60% (табл. 2). Основная часть прироста площади произошла за счет трансформации редин в редколесья (табл. 3, рис. 7). Эти изменения в основном отмечаются на высотах, где преобладали лиственные редины в 1976 г. (рис. 6). Тогда как увеличение площади редин соответствует более высоким поясам (площадь приросла на 10% на высотах 700–930 м над у.м.), и она удвоилась в низинах (450–500 м над у.м.). Трансформация редин в редколесья происходила



**Рис. 6.** Распределение нормализованных площадей классов наземного покрова по состоянию на 2005 г.: 1 – лиственные редколесья; 2 – лиственные редины и кустарники; 3 – лишайниковая тундра; 4 – каменистая тундра.



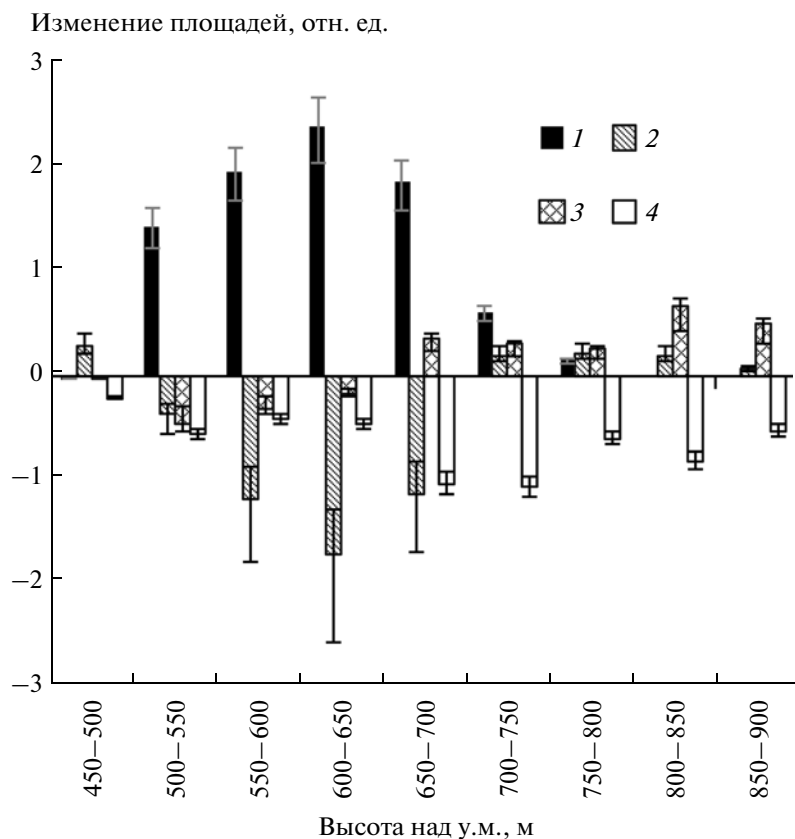


Рис. 7. Изменения нормализованных площадей за период 1976 (Quickbird) – 2005 (Hexagon + MSS): 1 – лиственничные редколесья; 2 – лиственничные редины и кустарники; 3 – лишайниковая тундра; 4 – каменистая тундра.

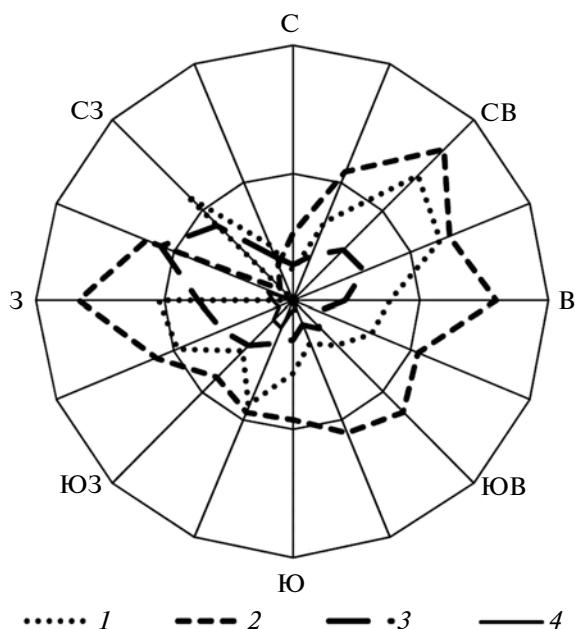


Рис. 8. Распределение площадей редколесий по азимутальным направлениям склонов по состоянию на 2005 г. Площади нормализованы и представлены для высотных срезов: 1 – 500–600 м над у.м.; 2 – 600–700 м над у.м.; 3 – 700–800 м над у.м.; 4 – 800–900 м над у.м.

главным образом на малых высотах; на 500–700 м над у.м. площадь редколесий возросла на 75%.

Большая часть лиственничных редколесий сосредоточена на южной и юго-западной экспозиции.

На высотах меньше 600 м над у.м. деревья предпочитают пологие склоны (до  $13^\circ$ ) северо-восточного ( $23^\circ$ – $67^\circ$ ) и юго-западного ( $203^\circ$ – $270^\circ$ ) направлений (рис. 8). На больших высотах, где характерны суровые ветра, деревья прячутся в складках рельефа (в локальных депрессиях, на склонах с крутизной более  $25^\circ$ , рис. 9) и предпочитают западные склоны ( $225^\circ$ – $315^\circ$ , рис. 8).

#### Динамика NDVI

Анализ снимков Landsat показал, что в зонах трансформации редин в редколесья в период 1973–2009 гг. значения индекса NDVI возросли на  $0.14 \pm 0.09$  (уровень значимости  $<0.1$ ). Из анализа данных MODIS в период 2002–2009 гг. изменения NDVI были незначительными на плато Путорана. Вероятно, это связано с уменьшением гидротермического индекса в этот период (рис. 4). Для растительного покрова коэффициенты наклонов линий трендов варьируются незначительно в пределах 0.038–0.116. Наиболее высокие значения

индексов NDVI соответствуют долинам рек, где типично присутствие кустарников и деревьев.

*Появление новых деревьев*

Сравнительный анализ космических снимков Quickbird и Hexagon позволил оценить появление новых деревьев. С учетом положения Солнца и пространственного разрешения снимка Quickbird, определены минимальные размеры детектируемого дерева (высота >2.5 м, с шириной кроной >1 м). На локальном участке площадью 16.4 га в зоне перехода редколесий в лишайниковую тундру, на высотах 670 ± 40 м над у.м., на склоне юго-западной экспозиции сделано экспертное дешифрирование и подсчитано количество новых деревьев за период с 1976 по 2005 гг. Установлено, что за 30-летний период появилось примерно три новых дерева на гектар.

*Положение границы леса*

Анализ снимка Quickbird и цифровой модели рельефа местности показал, что наибольшая высота расположения границы леса соответствует 930 м над у.м. При этом минимальный размер детектируемой кроны дерева составляет 1 м.

В общем случае обнаружено незначительное продвижение деревьев в зону тундры. В высокогорье линия леса нечеткая и прерывистая, расположена кусками. Ширина переходной зоны между тундрой и рединами варьируется от 50 до 400 м, а по высоте — от 30 до 200 м над у.м.

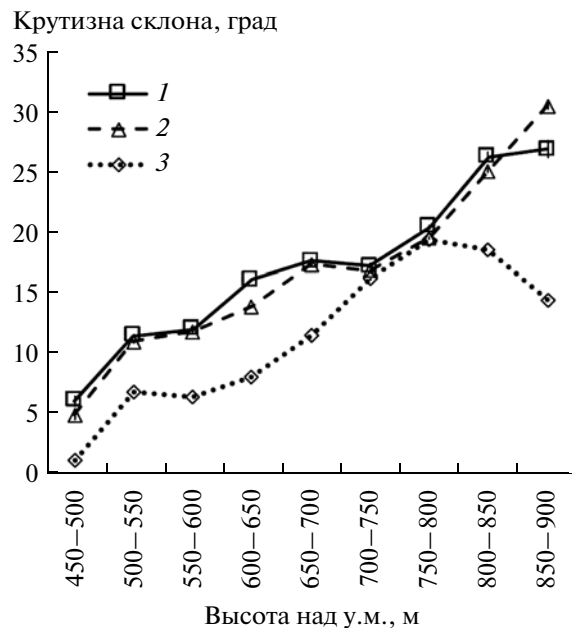
Косвенные оценки по данным ЦМР Aster GDEM, и снимкам Quickbird и Hexagon показали, что максимально границы редины сдвинулись по высоте с 841 до 858 м над у.м., а редколесий с 815 до 820 м над у.м. Соответственно оценочные скорости для редины <1.4 м/год, для редколесий — <0.3 м/год. Редины расположены на 10–30 м выше редколесий.

Медианы распределений площадей лиственных участков сдвинулись на 3–4 м за 30 лет. Вычисленные оценки являются примерными, так как ограничены вертикальным пространственным разрешением имеющейся цифровой модели рельефа.

**ОБСУЖДЕНИЕ**

*Пространственно-временная динамика лиственных участков*

Анализ снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешений показал различные оценки роста площадей редколесий: 40% из анализа снимков Landsat за 37-летний период (примерно 1% в год) и 60% из анализа Hexagon +



**Рис. 9.** Распределение средних значений крутизны склонов, соответствующих редколесьям для различных высотных срезов по состоянию на 2005 г.: 1 — лиственные редколесья; 2 — лиственные редины и кустарники; 3 — средняя крутизна склонов по всей территории заданного высотного среза.

+ MSS и Quickbird за 30-лет (около 2% в год). Вероятно, это вызвано более низкой точностью классификаций Landsat. Каппа-статистика для классификаций по Landsat равна 0.62 и 0.63, тогда как для классификаций Hexagon + MSS и Quickbird — 0.79 и 0.95.

К 2005 г. редколесья покрыли 5.6% исследуемой территории, это на 0.6% больше, чем в 1976 г.

Значительный рост NDVI на 0.14 ± 0.09 (уровень значимости <0.1) подтверждает рост сомкнутости. Аналогичное наблюдение сделано Жангом и др. (Zhang et al., 2009), которые фиксировали рост NDVI на 0.1–0.3 в зонах увеличения сомкнутости на 35% (с 19 до 25 м<sup>2</sup>/га) хвойных и лиственных лесов в экотоне лесотундры в горах Китая в период 1977–1999 гг.

Известно, что изменения наблюдаются и в других экотонах северной лесотундры Сибири. Например, известно, что в горах Полярного Урала (66° с.ш., 65.5° в.д.) площадь сомкнутых древостоев значительно увеличилась, за 41 год (1960–2002 гг.) их площадь возросла в 2.2 раза (Shiyatov et al., 2005). Авторы предположили, что причиной этому явлению служат рост температур и осадков в конце 20 в. (Shiyatov et al., 2007; Devi et al., 2009). Также в зоне самого северного участка древостоев Ары-Мас (72° с.ш., 101.5° в.д.) наблюдался рост сомкнутых древостоев на 65% в течение 36 лет, с 1965 по 2000 гг. (Kharuk et al., 2006).

### *Орография и динамика лиственничных древостоев*

Наибольшие изменения произошли на высотах 500–750 м над у.м., где происходила трансформация редин в редколесья (рис. 7). Примерно 40% редин увеличили сомкнутость (табл. 2).

Прирост площади лиственничных редколесий на небольших высотах (ниже 500 м над у.м.) и высоких участках (более 700 м над у.м.) указывает на распространение древесной растительности как вниз, так и вверх по градиенту высоты (рис. 7).

В общем установлено сокращение площадей тундр по всей наблюдаемой территории (рис. 7).

Вычисленная оценка скорости распространения деревьев вверх по градиенту высоты составила менее 14 м в декаду для редин и менее 2.6 м в декаду для редколесий. В горах Полярного Урала скорость распространения сравнима с указанной оценкой: сомкнутые деревья продвигались по высоте на 4 м в декаду, а редколесья на 3 м в декаду (Shiyatov et al., 2007). В Шведских Скандиях в течение прошлого столетия граница леса поднялась на 70–90 м (Kullman, Oberg, 2009). За последние 50 лет побеги ели (*Picea abies*) продвинулись по высоте на 240 м (5 м/год), сосны (*Pinus sylvestris*) — на 340 м (7 м/год) (Kullman, 2002). В горах Финской Лапландии высотная граница ели сместилась вверх на 100 м и березы на 40–60 м в течение 1947–2003 гг. (Middleton et al., 2008). Менее драматичные оценки скорости распространения деревьев в зону тундры установлены для наиболее северного древостоя Ары-Мас, где проективная скорость составила 3 м/год (Kharuk et al., 2006).

На малых высотах выделяются два доминирующих сектора в распределении площадей лиственничников по азимутальным направлениям склонов — это северо-восточные и западные склоны (рис. 8). Вероятно, этот эффект связан с ветрами и локальной топографией — туннель вдоль речной долины с северо-запада на юго-восток (рис. 8). На больших высотах лиственничники и кустарники преобладают на прогреваемых западных и юго-западных склонах.

Также с ростом высоты над уровнем моря деревья предпочитают укрытые участки с крутизной более 12° (рис. 9), и их пространственное распределение становится кластерным.

### *Климатические изменения и динамика лиственничных древостоев*

Для исследуемой территории характерен значительный рост среднегодовой температуры на 0.6°C (уровень значимости <0.06) в период 1976–2006 гг., по сравнению с предыдущим периодом (1945–1975 гг.), и относительно столетнего периода (1901–2000 гг.) среднегодовая температура возросла на 0.6°C (уровень значимости <0.05, рис. 2). Наблюдаются положительные тренды

летних температур в период 1974–1985 гг. (наклон тренда 0.63, уровень значимости <0.05, рис. 2) и в 1989–2006 гг. (наклон тренда 0.53, уровень значимости <0.05). Также выявлен положительный тренд зимних температур в период 1977–1998 гг. (наклон тренда 0.51, уровень значимости <0.05). В течение 1976–2006 гг. средние летние температуры увеличились на 0.5°C (уровень значимости <0.13) относительно предыдущего периода (1945–1975 гг.) и возросли на 0.4°C (уровень значимости <0.11) относительно столетнего периода (1901–2000 гг., рис. 2). Таким образом, рост среднегодовых температур на 0.6°C привел к продвижению древесной растительности не более чем на 15 м по высоте за последние 30 лет в конце 20 в. Для сравнения, в Шведских Скандиях рост среднегодовой температуры на 1°C привел к продвижению деревьев на 140 м вверх в течение 20 в. (Kullman, 2005). В горах Полярного Урала с ростом летних (на 0.7°C) и зимних (на 1.1°C) температур в течение 1920–2004 гг. (относительно 1883–1919 гг.) сомкнутые древостои продвинулись на 35 м, а редколесья на 26 м по высоте (Shiyatov et al., 2007).

В 1980-е годы наблюдается интенсивный рост возобновления в северо-восточной части плато Путорана (в течение 1980–1989 гг. появилось 28 подростов на га, (Knogge et al., 2006)). Гипотетически, такое явление происходило на исследуемой территории в связи с тем, что наблюдались значительный рост летних температур и позитивные тренды зимних температур. Наиболее теплыми периодами были 1978–1985 гг., когда летняя температура возросла на 0.9°C (уровень значимости <0.01, рис. 2), и 1998–2006 гг., когда летняя температура возросла на 1.1°C (уровень значимости <0.01, рис. 2) относительно среднего за столетний период (1901–2000 гг.). В нашем случае наблюдалось появление трех деревьев на га, обнаруженных из анализа сцен Quickbird и Hexagon. Для сравнения, на севере Канады в период 1947–1989 гг. зафиксировано появление  $9 \pm 3$  новых деревьев на га в еловых древостоях (Danby, Hik, 2007).

В целом в период 1979–2002 гг. наблюдается положительный тренд гидротермического индекса (наклон тренда 0.47, уровень значимости <0.05, рис. 4); после 2002 г. индекс идет вниз. В то же время в 1980-е годы гидротермический индекс был значительно ниже среднего за столетний период (1901–2000 гг., рис. 4), что связано с малым количеством осадков (рис. 3). В 1982–1987 гг. среднее количество осадков было 385 мм, что меньше такового за столетие на 70 мм (уровень значимости <0.05, рис. 3). Недостаток влажности в летний период, вероятно, привел к замедлению роста деревьев, но вызвал рост количества подростов. Связи с изменениями зимних осадков не найдено.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 20 в. на плато Путорана наблюдаются значительный рост деревьев и увеличение сомкнутости древостоев, индуцированные потеплением климата. Площадь редколесий увеличилась на 60% в течение 30 лет за счет увеличения сомкнутости деревьев в редирах. Это явление главным образом проявляется на низких высотах вдоль речной долины. Также наблюдается значительный рост индекса NDVI (на 0.14) в зонах увеличения сомкнутости.

В исследуемой зоне антропогенное воздействие минимально. Наблюдаемые явления в основном связаны с климатическими изменениями. Рост среднегодовой температуры на 0.6°C в течение последних трех деkad 20 в. привел к продвижению границы леса по градиенту высоты не более чем на 15 м вверх, и появлению трех новых деревьев на га. Оценки скоростей распространения деревьев в зону тундры затруднено из-за небольших измеряемых параметров и ограничений в пространственном разрешении данных ДЗ.

Выживаемость и рост деревьев, а также их реакция на изменения климата значительно зависят от топографии местности. С ростом высоты над у.м. деревья прячутся в локальных депрессиях на крутых прогреваемых склонах (до 30°) юго-западной экспозиции.

Работа поддержана грантом МК-2497.2009.5 (грант Президента РФ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вопросы физической географии СССР / Под ред. Гвоздецкого Н.А., Глазковой М.А. Москва: Издательство Московский университет, 1959. 183 с.
- Гвоздецкий Н.А.* Физическо-географическое районирование СССР. М.: МГУ, 1968. 576 с.
- Куваев В.Б.* К выделению пояса холодных каменных пустынь в горах севера Евразии // Ботанический журнал АН СССР. 1961. Т. 3. С. 337–347.
- Пармузин Ю.П.* Средняя Сибирь. Очерк природы. М.: Мысль, 1964. 313 с.
- Румянцев В.И.* Ландшафтные различия озерных котловин южной, центральной и северо-восточной частей гор Путорана. Природно-ландшафтные условия озер Путорана // Тр. Лимнологического института СО АН СССР. Новосибирск: Наука, 1976. Т. 22. № 42. С. 163–175.
- Флора Путорана / Под ред. Л.И. Малышева. Новосибирск: Наука, 1976. 248 с.
- ACIA, Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge Univ. Press, 2005. 1042 p. <http://www.acia.uaf.edu>.
- Danby R.K., Hik D.S.* Evidence of recent treeline dynamics in southwest Yukon from aerial photographs // Arctic. 2007. V. 60. № 4. P. 411–420.
- Devi N., Hagedorn F., Moiseev P., Bugmann H., Shiyatov S., Mazepa V., Rigling A.* Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century // Global Change Biol. 2008. V. 14. P. 1581–1591. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x
- ERDAS Field Guide. 2010. USA: ERDAS, Inc. 842 p.
- Esper J., Schweingruber F.H.* Large-scale treeline changes recorded in Siberia // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № L06202. doi: 10.1029/2003GL019178.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M. et al.* The Shuttle radar topography mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45. № 2. doi:10.1029/2005RG000183.
- Holtmeie F.* Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. N.Y.: Springer, 2009. 438 p.
- Huemmerich K.F.* The GeoSail model: A simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance // Rem. Sens. Env. 2001. V. 75. P. 423–431.
- IPCC, 2007: Climate change: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team / Eds. R.K. Pachauri, A. Reisinger. Geneva: IPCC, 2007. 104 p. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_spm.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf).
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Im, S.T., Naurzbaev M.M.* Forest-tundra larch forests and climatic trends // Russ. J. Ecol. 2006. V. 37. № 5. P. 291–298. doi: 10.1134/S1067413606050018.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T., Vdovin A.S.* Spatial distribution and temporal dynamics of high-elevation forest stands in southern Siberia // Global Ecol. Biogeogr. 2010. V. 19. № 6. P. 822–830. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x
- Knorre A.A., Kirilyanov A.V., Fedotova E.V., Naurzbaev M.M.* Variation of species diversity and above ground biomass along the altitudinal transect in north-western boundary of the Putorana Mountains // Geogr. Nat. Resources. 2006. P. 75–81.
- Kullman L., Oberg L.* Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective // J. Ecol. 2009. V. 97. № 3. P. 415–429.
- Kullman L.* Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes // J. Ecol. 2002. V. 90. P. 68–77. doi:10.1046/j.0022-0477.2001.00630.x
- Kullman L.* Pine (*Pinus sylvestris*) treeline dynamics during the past millennium – a population study in west-central Sweden // Ann. Bot. Fennici. 2005. V. 42. P. 95–106.
- Lloyd A.H., Fastie C.L.* Recent changes in treeline forest distribution and structure in interior Alaska // Ecoscience. 2003. V. 10. № 2. P. 176–185.
- MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Beilman D.W.* Climate change and the northern Russian treeline zone // Phil. Trans. R. Soc. 2008. V. B 363. P. 2285–2299.
- Masek J.G.* Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery // J. Biogeogr. 2001. V. 28. P. 967–976.
- Middleton M., Narhi P., Sutinen M.-L., Sutinen R.* Object based change detection of historical aerial photographs reveals altitudinal forest expansion // GEOBIA 2008. Pixels, objects, intelligence: GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st century. Calgary, Alberta, Canada. August 05–08, 2008. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-4/C1. Calgary: Univ. of Calgary. 6 p.

- Mitchell T.D., Jones P.D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids // *Int. J. Clim.* 2005. V. 25. № 6. P. 693–712.
- Munroe J.S.* Estimates of Little Ice Age climate inferred through historical rephotography, Northern Uinta Mountains, U.S.A. // *Arctic Antarctic Alpine Res.* 2003. V. 35. P. 489–498.
- Natural resources and environment Victoria's statewide forest resource inventory. Forests service technical report 99-2. Dep. Nat. Res. Env. East Melbourne, Victoria. 1999. 76 p.
- Olthof I., Pouliot D.* Treeline vegetation composition and change in Canada's Western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling // *Rem. Sens. Env.* 2010. V. 114. P. 805–815. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.017.
- Phol C., Van Genderen J.L.* Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // *Int. J. Rem. Sens.* 1998. V. 19. № 5. P. 823–854. doi: 10.1080/014311698215748.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I.* Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2003. V. 41. № 5. P. 1056–1061. doi: 10.1109/TGRS.2003.811693.
- Richelson J.T.* The wizards of Langley: inside the CIA's directorate of science and technology. Boulder, Colorado: Westview Press, 2001. 416 p.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V.* Spatiotemporal dynamics of forest-tundra communities in the Polar Urals // *Russ. J. Ecol.* 2005. V. 36. № 2. P. 69–75.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E.* Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century // *Russ. J. Ecol.* V. 2007. V. 4. № 38. P. 223–227.
- Surazakov A.B., Aizen V.B.* Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery // *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 2010. V.76. № 5. P. 603–608.
- Szeicz J.M., Macdonald G.M.* Recent white spruce dynamics at the sub-Arctic alpine treeline of North-Western Canada // *J. Ecol.* 1995. V. 83. № 5. P. 873–885.
- Welch R., Ehlers W.* Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data // *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 1987. V. 53. № 3. P. 301–303.
- Zhang Y., Xu M., Adams J., Wang X.* Can Landsat imagery detect tree line dynamics? // *Int. J. Rem. Sens.* 2009. V. 30. № 5. P. 1327–1340.

## Climate Induced Changes in Alpine Forest-Tundra Ecotone, Siberian Arctic Mountains

S. T. Im, V. I. Kharuk

Forest-tundra ecotone spatial and temporal dynamics in the Putorana Mountains (Northern Siberia) was analyzed for 36 years period based on Landsat (1973, 2009), Hexagon (1976), Quickbird (2005) and Terra/MODIS (2002–2009) satellite scenes. Three land cover categories were selected: sparse larch stands (with crown closure (cc)  $\geq 0.2$ ); very sparse stands (cc  $< 0.2$ ) and shrubs; background. The area of sparse stands increased on 60%; it was due to transformation caused by increase of density in very sparse stands. This phenomenon mainly takes place at low (450–550 m) elevations along the river valley. Additionally increase of NDVI (on 0.14) was observed indicating densification of stands. Rise of mean annual temperature by 0.6°C during the last three decades of the 20-th century resulted in upward treeline shift on  $< 15$  m a.s.l and growth of three new trees per ha. With increasing of elevation, trees prefer sheltered local depressions with southeastern slopes up to 30 degrees.

**Keywords:** Putorana Mountains, forest-tundra, ecotone spatial and temporal dynamics, Landsat, Quickbird, MODIS, Hexagon, NDVI