

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт экологии и географии
Кафедра географии

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. Ю. Ямских
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

05.03.02 География

05.03.02.02 «Физическая география и ландшафтоведение»

**Геоинформационный анализ изменения северной границы лиственных
древостоев**

Научный руководитель	_____	<u>доц., канд. тех. наук</u>	<u>С. Т. Им</u>
	подпись, дата	должность, учёная степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>К. А. Степанов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>Д. М. Шлемберг</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
1 Теоретическая часть.....	4
1.1 Дистанционное зондирование.....	4
1.2 Зональные границы – экотоны.....	20
1.3 Анализ изменения границы лиственничного древостоя.....	23
1.3.1 Анализ изменения границы лиственничного древостоя за рубежом ...	34
1.4 Прогнозирование.....	35
2 Основная часть.....	42
2.1 Используемые материалы.....	42
2.2 Объект исследования.....	45
2.3 Методы и методика исследования.....	49
2.4 Результаты.....	58
Заключение.....	61
Список использованных источников.....	62
Приложение А Графики изменения температуры и осадков для первого участка.....	67
Приложение Б Графики изменения температуры и осадков для второго участка.....	68
Приложение В Графики изменения температуры и осадков для третьего участка.....	69

ВВЕДЕНИЕ

Трансформационные процессы в экологических системах происходят постоянно, однако их наличие и динамику иногда довольно проблематично зафиксировать, в силу длительного, по времени, генезиса. Ярким примером таких изменений служат леса северной части России, на границе тайга-тундра. Исследования, которые, в то же время, усложняются суровыми климатическими условиями и труднодоступностью территории.

Наиболее оптимальным решением в данном случае будет использование геоинформационных технологий и систем для сбора, систематизации и обработки информации о конкретном лесном массиве, либо участке земли. С их помощью достигается ощутимое повышение эффективности производственной деятельности в таких областях, как общегеографическое и тематическое картографирование, землеустройство и землепользование, контроль источников загрязнения окружающей среды и наблюдение за экологической обстановкой в целом, гидротехника и мелиорация, лесное хозяйство и т.д. Важнейшее значение имеют также многолетние ряды космических данных дистанционного зондирования Земли для проведения климатологических исследований, изучения Земли как целостной экологической системы.

Целью данного исследования является проведение геоинформационного анализа северной границы лиственных древостоев России.

Задачи исследования:

1. изучить существующие публикации и наработки по теме исследования, включая теоретические и практические аспекты применения геоинформационных технологий и методов дистанционного зондирования Земли;
2. разработать методику анализа северной границы лиственных древостоев России на основе данных дистанционного зондирования Земли и ГИС;

3. собрать, систематизировать и обработать необходимые материалы по разработанной методике с целью выделения северной границы лиственничных древостоев;

4. провести анализ изменения северной границы лиственничных древостоев и выявить их связи с климатическими трендами;

5. полученные результаты использовать для прогнозирования развития лиственничных древостоев на севере России с учетом тенденций в изменении климата в 21 веке.

Объектом исследования являются лиственничные древостои, древесные сообщества вида *Larix*, произрастающие на севере России.

Предмет исследования – инструменты геообработки программного пакета ESRI ArcGIS, сопутствующие картографические материалы и климатические данные.

1 Теоретическая часть

1.1 Дистанционное зондирование

Современное представление дистанционного зондирования возникло с освоением человеком неба. Г. Турнахон (псевдоним Надар) сделал фотографии Парижа с воздушного шара в 1858 году. Большая часть первых снимков не была полезна для картографирования или для научных целей.

Систематическая аэрофотосъемка была разработана для целей военного наблюдения и разведки. При этом важно отметить, что данные технологии и до сегодняшнего дня развиваются в направлении миниатюризации не в убыток качеству.

Развитие искусственных спутников во второй половине 20-го века позволило дистанционному зондированию продвинуться в глобальном масштабе до окончания холодной войны. Различные инструменты на борту спутников наблюдения Земли и метеорологических спутников, таких как Landsat, Nimbus и более поздние миссии, такие как RADARSAT и UARS, обеспечили глобальные измерения различных данных для гражданских, исследовательских и военных целей. Космические зонды на других планетах также предоставили возможность проводить исследования дистанционного зондирования, радиолокатор с синтезированной апертурой на борту космического аппарата Магеллана сделал подробные топографические карты Венеры, а приборы на борту SOHO позволили провести исследования на Солнце и солнечном ветре.

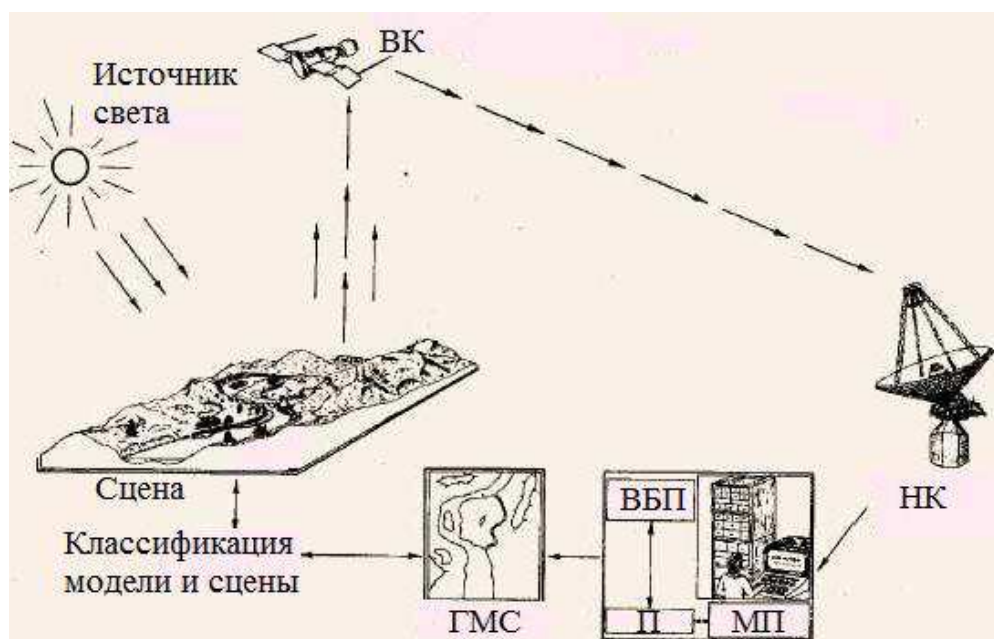
Последние разработки включают в себя, начиная с 1960-х и 1970-х годов, непосредственную обработку изображений спутниковых снимков. Несколько исследовательских групп в Силиконовой долине, включая NASA Ames Research Center, GTE и ESL Inc., разработали методы преобразования Фурье, что привело к первому заметному улучшению данных изображений. В 1999 году

был запущен первый коммерческий спутник (IKONOS), собирающий изображения с очень высоким разрешением [41].

Согласно [4], технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются незаменимым инструментом для изучения и постоянного мониторинга планеты. Современное развитие ДЗЗ расширяет сферу их применения, от социально–экономической до экологической сферы развития.

Так, изображения, которые получены спутниками ДЗЗ, находят свое применение во многих отраслях, таких как сельское хозяйство, геологические и гидрологические исследования, лесоводство, охрана окружающей среды, планировка территорий, образование, разведка и военные цели.

Космические системы ДЗЗ делают возможным получать необходимые данные с больших площадей (к ним также относятся труднодоступные и опасные участки) за короткое время (рисунок 1) [4].



ГМС – геологическая модель сцены; ВК – Высотный комплекс (носитель, датчики, первичная обработка и пересылание данных); НК – наземный комплекс (прием, обработка, регистрация, хранение); ВБП – внешняя база пользователя; МП – материалы для пользователя; П – пользователь.

Рисунок 1 – Структурная схема дистанционного зондирования Земли с помощью космического спутника.

Под дистанционным зондированием следует понимать сбор информации с помощью регистрирующего прибора, не находящегося в непосредственном контакте с изучаемым объектом или явлением [2, 13, 16].

В системах дистанционного зондирования имеются три основных компонента: устройство для создания изображения, регистр данных и база для проведения зондирования [2].

Приборы, которые формируют изображения, делятся на четыре основные категории: фото – и кинокамеры, многоспектральные сканеры, радиометры и активные радиолокаторы. Современные однообъективные зеркальные фотокамеры создают изображение, фокусируя ультрафиолетовое, видимое или инфракрасное излучение, приходящее от объекта, на фотопленке. После проявления пленки получается постоянное (способное сохраняться длительное время) изображение. Видеокамера позволяет получать изображение на экране; постоянной записью в этом случае будет соответствующая запись на видеоленте или фотоснимок, сделанный с экрана. Во всех других системах визуализации изображений используются детекторы или приемники, обладающие чувствительностью на определенных длинах волн спектра [13, 16].

Фотоэлектронные умножители и полупроводниковые фотоприемники, используемые в сочетании с оптико-механическими сканерами, позволяют регистрировать энергию ультрафиолетового, видимого, а также ближнего, среднего и дальнего, ИК-участков спектра и преобразовывать ее в сигналы, которые могут давать изображения на пленке. Энергия микроволн (диапазон сверхвысоких частот, СВЧ) подобным же образом трансформируется радиометрами или радиолокаторами. В сонарах для получения изображений на фотопленке используется энергия звуковых волн [16].

Наиболее распространенными в ДЗ являются пассивные датчики, собирающие излучение, которое излучается или отражается объектом или окружающими его областями. Отраженный солнечный свет является наиболее распространенным источником излучения, измеренным пассивными датчиками.

Примеры пассивных дистанционных датчиков включают фотопленку, инфракрасные, заряженные устройства и радиометры. Активная коррекция, с другой стороны, излучает энергию для сканирования объектов и областей, после чего датчик затем обнаруживает и измеряет излучение, которое отражается или обратно рассеивается от цели [41].

Приборы, используемые для визуализации изображений, размещают на различных базах, в том числе на земле, судах, самолетах, воздушных шарах и космических летательных аппаратах. Специальные камеры и телевизионные системы повседневно используются для съемки представляющих интерес физических и биологических объектов на земле, на море, в атмосфере и космосе. Специальные камеры замедленной киносъемки применяются для регистрации таких изменений земной поверхности, как эрозия морских берегов, движение ледников и эволюция растительности [6].

Системы RADAR и LiDAR являются примерами активного дистанционного зондирования, где измеряется временная задержка между эмиссией и возвратом электромагнитного сигнала, устанавливая местоположение, скорость и направление объекта (рисунок 2) [41].

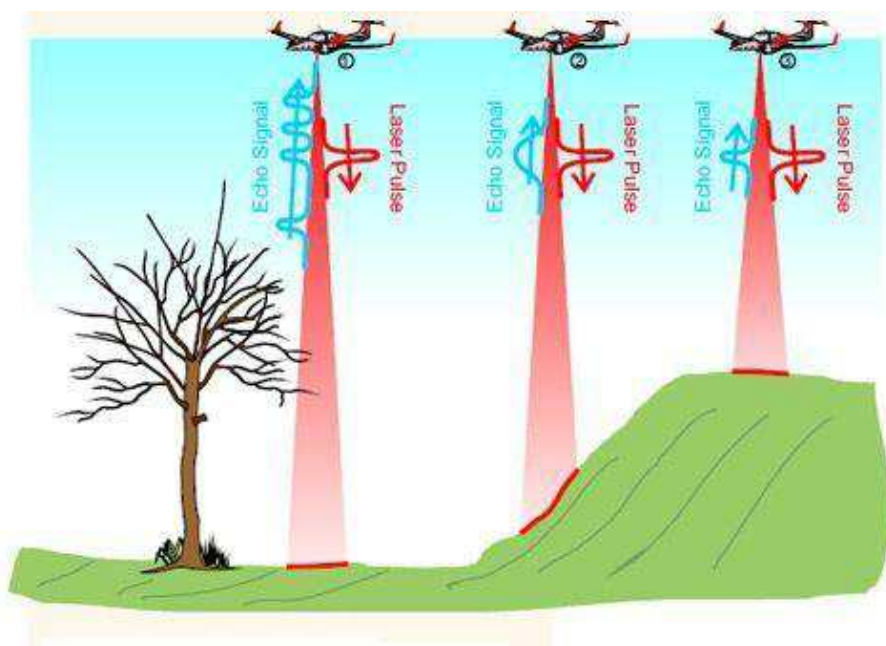


Рисунок 2 – Зондирование земной поверхности с помощью авиации

Дистанционное зондирование позволяет собирать данные в опасных или недоступных областях. Приложения дистанционного зондирования включают мониторинг обезлесения в таких областях, как бассейн Амазонки, ледниковые структуры в арктических и антарктических районах и глубинное зондирование прибрежных и океанских глубин. Гонка вооружений во время «холодной войны» использовала информацию об опасных пограничных зонах. Дистанционное зондирование также заменяет дорогостоящий и медленный сбор данных на местах, обеспечивая при этом не нарушение областей и объекты исследования.

Орбитальные платформы собирают и передают данные из разных частей электромагнитного спектра, которые в сочетании с более крупным воздушным или наземным зондированием и анализом предоставляют исследователям достаточную информацию для мониторинга таких тенденций, как Эль-Ниньо и другие природные явления с длинными и краткосрочными явлениями.

Самая важная часть дистанционного зондирования – анализ изображений. Такой анализ может выполняться визуально, визуальными методами, усиленным применением компьютера, и целиком и полностью компьютером; последние два включают в себя анализ данных в цифровой форме. Сегодня многие ученые ведут лабораторные и полевые исследования спектральных характеристик различных природных изменений, происходящих на Земле.

Согласно [6], идеи таких исследований нашли применение в конструкции многоспектральных сканеров MSS (Multi-Spectral-Scanners), которые используются на самолетах и КЛА. Искусственные спутники Земли «Landsat» 1, 2 и 4 имели на борту MSS с четырьмя спектральными полосами: от 0,5 до 0,6 мкм (зеленая); от 0,6 до 0,7 мкм (красная); от 0,7 до 0,8 мкм (ближняя ИК); от 0,8 до 1,1 мкм (ИК). На спутнике «Landsat-3» используется, кроме того, полоса 10,4-12,5 мкм.

На рисунке 3 представлены диапазоны электромагнитных волн. Которые используются в процессе дистанционного зондирования земли различной специализированной техникой и приборами.

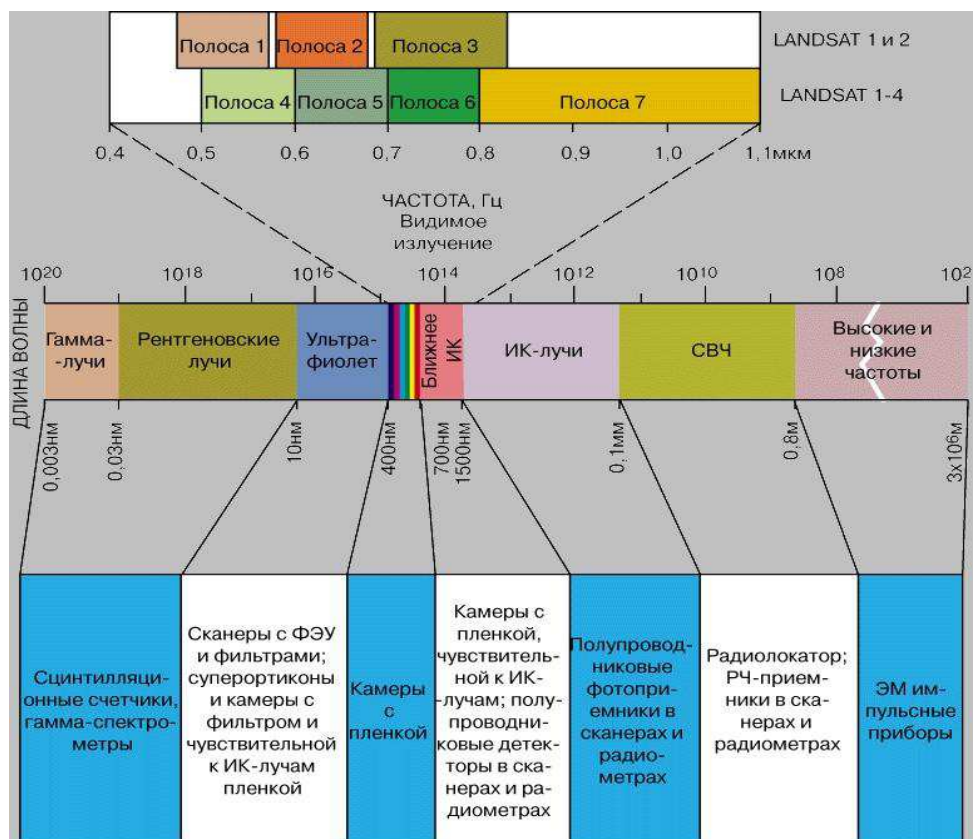


Рисунок 3 – Электромагнитный спектр и его деление с указанием длин волн, устанавливаемых различными приборами

Стандартные составные изображения с применением метода искусственного окрашивания получаются при комбинированном использовании MSS с первой, второй и четвертой полосами в сочетании с синим, зеленым и красным фильтрами соответственно. На спутнике «Landsat-4», с усовершенствованным сканером MSS, тематический картопостроитель позволяет получать изображения в семи спектральных полосах: трех – в области видимого излучения, одной – в ближней ИК-области, двух – в средней ИК-области и одной – в тепловой ИК-области. Благодаря этому прибору пространственное разрешение было улучшено почти втрое (до 30 м)

по сравнению с тем, что давал спутник «Landsat», на котором использовался только сканер MSS.

Поскольку чувствительные датчики спутников не предназначались для стереоскопической съемки, дифференцировать те или иные особенности и явления в пределах одного конкретного изображения пришлось, используя спектральные различия. Сканеры MSS позволяют различать пять широких категорий земных поверхностей: вода, снег и лед, растительность, обнаженная порода и почва, а также объекты, связанные с деятельностью человека.

Научный работник, хорошо знакомый с исследуемой областью, может выполнить анализ изображения, полученного в одной широкой полосе спектра, каким, например, является черно-белый аэрофотоснимок, который в типичном случае получается при регистрации излучений с длинами волн от 0,5 до 0,7 мкм (зеленая и красная области спектра). Однако с увеличением числа новых спектральных полос глазам человека становится все труднее проводить различия между важными особенностями похожих тонов в различных участках спектра.

Так, например, только один съемочный план, снятый со спутника «Landsat» с помощью MSS в полосе 0,5-0,6 мкм, содержит около 7,5 млн. пикселей (элементов изображения), у каждого из которых может быть до 128 оттенков серого в пределах от 0 (черный цвет) до 128 (белый цвет). При сравнении двух изображений одной и той же области, сделанных со спутника «Landsat», приходится иметь дело с 60 млн. пикселей. Одно изображение, полученное с «Landsat-4» и обработанное картопостроителем, содержит около 227 млн. пикселей. Отсюда следует, что для анализа таких изображений необходимо использовать компьютеры [6].

В системе интерактивного анализа цифрового изображения IDIMS используется схема нерегулируемой классификации. IDIMS автоматически помещает каждый пиксель в один из нескольких десятков классов. После компьютерной классификации сходные классы (например, пять или шесть

водных классов) могут быть собраны в один. Однако многие участки земной поверхности имеют довольно сложные спектры, что затрудняет однозначное установление различий между ними. Дубовая роща, например, может оказаться на изображениях, полученных со спутника, спектрально неотличимой от кленовой рощи, хотя на земле эта задача решается очень просто. По спектральным же характеристикам дуб и клен относятся к широколиственным породам. Компьютерная обработка алгоритмами идентификации содержания изображения позволяет заметно улучшить максимальный размер сигмента по сравнению со стандартным [6].

Радиолокатор интерферометрической синтетической апертуры используется для создания точных цифровых моделей рельефа крупномасштабной местности (RADARSAT, TerraSAR-X, Magellan).

Лазерные и радиолокационные альтиметры на спутниках обеспечивают широкий диапазон данных. Измеряя выпуклости воды, вызванные гравитацией, они отображают особенности на морском дне с разрешением в милю или около того. Измеряя высоту и длину волны океанских волн, высотомеры измеряют скорости и направление ветра, а также поверхностные океанские течения и направления.

Ультразвуковые (акустические) и радиолокационные измерительные приборы измеряют уровень моря, приливы и волновое направление в прибрежных и морских калибрах.

LIDAR используется для обнаружения и измерения концентрации различных химических веществ в атмосфере, а воздушный LIDAR можно использовать для более точной оценки высоты объектов и характеристик на земле, чем с помощью радиолокационной технологии. Дистанционное зондирование растительности является основным применением LIDAR.

Радиометры и фотометры являются наиболее распространенным инструментом в использовании, собирая отраженное и излучаемое излучение в широком диапазоне частот. Наиболее распространенными являются видимые и инфракрасные датчики, за которыми следуют микроволны, гамма-

луч и редко, ультрафиолет. Они также могут быть использованы для обнаружения спектров излучения различных химических веществ, содержащих данные о химических концентрациях в атмосфере [41].

Стереографические пары аэрофотоснимков часто использовали для создания топографических карт при помощи изображений и геологов в транспортных средствах и автомагистралях для потенциальных маршрутов в дополнение к моделированию наземных объектов обитания [37, 41, 48].

Одновременные мультиспектральные платформы, такие как Landsat, применяют с 1970-х годов. Эти тематические карты способны принимать изображения на нескольких длинах волн электромагнитного излучения (мультиспектральные) и, как правило, встречаются на спутниках наблюдения Земли, включая (например) программу Landsat или спутник IKONOS.

Карты наземного покрова и землепользования из тематического картографирования могут быть использованы при поиске полезных ископаемых, обнаружения или мониторинга использования земли, обнаружения инвазивной растительности, обезлесения и изучения состояния здоровья местных растений и сельскохозяйственных культур, включая целые районы или леса сельского хозяйства. Изображения Landsat используются регулирующими органами, такими как KYDOW, чтобы определять параметры качества воды, включая глубину, плотность хлорофилла и общее содержание фосфора.

Гиперспектральное изображение создает изображение, где каждый пиксель имеет полную спектральную информацию с узкими спектральными полосами изображения в смежном спектральном диапазоне. Гиперспектральные изображения используются в различных приложениях, таких как минералогия, биология, безопасность и охрана окружающей среды.

В рамках борьбы с опустыниванием дистанционное зондирование делает возможным для исследователей отслеживать и контролировать зоны риска в долгосрочной перспективе, определять факторы опустынивания,

поддерживать лиц, принимающих решения, в установлении соответствующих мер по управлению окружающей средой и оценивать их воздействие [41].

Зондирующие системы могут быть представлены:

1. сонаром: пассивный сонар – принимает звук, который был создан другим объектом (судно, кит и т. д.); активный сонар – издает импульсы звуков и прослушивает эхо-сигналов, которые используются при обнаружении, ранжировании и измерении подводных объектов и местности;

2. сейсмографом: сейсмограммы, выполненные в разных местах, определяют и измеряют землетрясения (после их возникновения) путем сравнения относительной интенсивности и точных периодов времени;

3. ультразвуковыми датчиками, излучающими высокочастотные импульсы и прислушивающимися к эхо-сигналам.

Для координации серии крупномасштабных наблюдений большинство зондирующих систем зависят от расположения платформы и ориентации датчика. Высококачественные инструменты как правило используют позиционную информацию от спутниковых навигационных систем. Вращение и ориентация чаще всего предоставлены в градусах или с помощью двух электронных компасов. Компасы могут измерять не только азимут (т. е. Градусы к магнитному северу), но и высоту (в градусах над горизонтом), поскольку магнитное поле искривляется под разными углами на разных широтах Земли. Более точные ориентации требуют гироскопической ориентации, периодически перестраиваемой различными способами, включая навигацию со звезд или известных эталонных тестов [41].

Обобщая, можно говорить о том, что дистанционное зондирование работает по принципу обратной задачи. Хотя объект или явление, представляющее интерес (состояние), не может быть непосредственно измерен, существует какая-то другая переменная, которая может быть обнаружена и измерена (наблюдение), связать с объектом с явлением, представляющим интерес, посредством вычисления. Общая аналогия, данная

для описания этого, пытаются определить тип животного от его следов. Например, хотя невозможно напрямую измерять температуры в верхней атмосфере, можно измерить спектральные выбросы от известных химических веществ (таких как диоксид углерода) в этом регионе. Затем частота выбросов может быть связана с термодинамикой и температурой в этой области.

Качество данных ДЗ состоит из пространственных, спектральных, а также радиометрических и временных разрешений.

Пространственное разрешение. Размер пикселя, который записывается в растровое изображение – обычно пиксели могут соответствовать квадратным областям, расположенным в пределах длины стороны от 1 до 1000 метров (от 3,3 до 3,280,8 фута).

Спектральное разрешение. Длина волны различных записанных частотных полос – обычно это связано с количеством полос частот, зарегистрированных платформой. Текущая коллекция Landsat – это семь полос, в том числе несколько в инфракрасном спектре, от спектрального разрешения от 0,07 до 2,1 мкм. Датчик Hyperion на Earth Observing-1 разрешает 220 полос от 0,4 до 2,5 мкм со спектральным разрешением от 0,10 до 0,11 мкм на полосу.

Радиометрическое разрешение. Число различных интенсивностей излучения, которое датчик способен отличить. Как правило, это диапазон от 8 до 14 бит, что соответствует 256 уровням серой шкалы и до 16 384 интенсивностей или «оттенков» цвета в каждой полосе. Это также зависит от шума прибора.

Временное разрешение. Частота эстакад по спутнику или плоскости, и имеет значение только в исследованиях временных рядов или тех, которые требуют усредненного или мозаичного изображения, как при мониторинге обезлесения. Это было впервые использовано разведывательным сообществом, где повторное покрытие выявило изменения в инфраструктуре, развертывание подразделений или модификацию оборудования. Облачное

покрытие по заданной области или объекту делает необходимым повторить сбор указанного местоположения.

Для создания карт на основе датчиков большинство систем дистанционного зондирования ожидают экстраполяции данных датчиков относительно контрольной точки, включая расстояния между известными точками на земле. Это зависит от типа используемого датчика. Например, на обычных фотографиях расстояния точны в центре изображения, при этом искажение измерений увеличивается, чем дальше от центра.

Другим фактором является то, что на валике, на которую наматывается пленка, могут возникать серьезные ошибки, когда фотографии используются для измерения расстояний на земле. Шаг, на котором эта проблема решена, называется привязкой к геоинформации и включает автоматическое сопоставление точек на изображении (обычно 30 или более точек на изображение), которое экстраполируется с использованием установленного эталона, «деформируя» изображение для создания точных пространственных данных. На сегодняшний день, большинство спутниковых изображений полностью привязаны к географическим линиям.

Кроме того, изображения могут нуждаться в радиометрическом и атмосферном исправлении.

Радиометрическая коррекция. Позволяет избежать радиометрических ошибок и искажений. Освещение объектов на поверхности Земли неравномерно из-за различных свойств рельефа. Этот фактор учитывается в методе коррекции радиометрического искажения [32]. Радиометрическая коррекция дает масштаб значениям пикселей: монохроматический масштаб от 0 до 255 будет преобразован в фактические значения сияния.

Топографическая коррекция (также называемая коррекцией ландшафта). В горной местности, за счет неоднородности рельефа, эффективное освещение пикселей значительно варьируется. В изображении с дистанционным зондированием пиксель на тенистом склоне получает слабую освещенность и имеет низкое значение сияния, напротив, пиксель на

солнечном склоне получает сильное освещение и имеет высокое значение сияния. Для того же объекта значение сияния пикселя на тенистом склоне будет отличаться от значения на солнечном склоне. Кроме того, разные объекты могут иметь одинаковые значения сияния. Эта неоднозначность серьезно повлияла на точность извлечения информации о дистанционном зондировании в горных районах и стала главным препятствием для дальнейшего использования изображений дистанционного зондирования. Цель топографической коррекции – устранить этот эффект, восстановить истинную отражательную способность или сияние объектов в горизонтальных условиях. Это предпосылка применения количественного дистанционного зондирования.

Атмосферная коррекция. Устранение атмосферной дымки путем масштабирования каждой полосы частот, так что ее минимальное значение (обычно реализуемое в водных объектах) соответствует значению пикселя 0. Оцифровка данных также позволяет манипулировать данными, изменяя значения шкалы серого.

Интерпретация – это критический процесс понимания данных. Первым было приложение аэрофотосъемки, в котором использовался следующий процесс: пространственное измерение посредством использования световой таблицы как в обычном одиночном, так и в стереографическом покрытии, добавлены такие навыки, как использование фотограмметрии, использование фотомозаики, повторное покрытие, использование известных размеров объектов для обнаружения изменений. Image Analysis – это недавно разработанное автоматизированное приложение, которое все чаще используется для подобных целей [41].

Объектно-ориентированный анализ изображений (OBIA) – это субдисциплина GIScience, посвященная разделению изображений дистанционного зондирования на осмысленные объекты изображения и оценка их характеристик через пространственный, спектральный и временной масштаб.

Старые данные дистанционного зондирования часто ценны, поскольку они могут обеспечить единственные долгосрочные данные для географии. В то же время данные часто сложны для интерпретации и громоздки для хранения. Современные системы имеют тенденцию хранить данные в цифровом виде, часто со сжатием без потерь.

Чтобы облегчить процесс обработки данных на практике, создано несколько «уровней», которые были впервые определены в 1986 году NASA в рамках системы наблюдения Земли [25] и неуклонно принимались с тех пор как внутри NASA (например, [39]), так и в другом месте. К ним относятся:

1. 0 – восстановленные, необработанные данные прибора и полезной нагрузки при полном разрешении

2. 1a – реконструированные, необработанные данные прибора с полным разрешением, с указанием времени и аннотированные с помощью вспомогательной информации, включая радиометрические и геометрические коэффициенты калибровки и параметры геопривязки (например, эфемериды платформы), вычисленные и добавленные, но не применяемые к данным Уровня 0 (или применяемые таким образом, чтобы уровень 0 полностью извлекался из данных уровня 1a);

3. 1b – данные уровня 1a, которые были обработаны на датчиках (например, поперечное сечение радара, яркостная температура и т. д.); не все инструменты имеют данные уровня 1b; данные уровня 0 не извлекаются из данных уровня 1b;

4. 2 – геофизические производные (высота океана, влажность почвы, концентрация льда) с тем же разрешением и местоположением, что и данные начального уровня 1;

5. 3 – переменные, нанесенные на равномерные пространственно-временные шкалы сетки, обычно с некоторой полнотой и согласованностью (например, пропущенные точки интерполированы, полные области, мозаичные вместе с нескольких орбит и т. д.);

б. 4 – выход модели или результаты анализа данных нижнего уровня (т. е. переменные, которые не были измерены инструментами, а взяты из этих измерений).

Запись данных уровня 1 является самой фундаментальной (то есть наивысшей реверсивной) записью данных, которая имеет значительную научную полезность и является основой, на которой производятся все последующие наборы данных.

Уровень 2 – это первый уровень, который непосредственно используется для большинства научных приложений; его значение намного больше нижних уровней. Наборы данных уровня 2 имеют тенденцию быть менее объемными, чем данные Уровня 1, поскольку они были уменьшены временно, пространственно или спектрально.

Наборы данных уровня 3, как правило, меньше, чем наборы данных более низкого уровня, и, таким образом, их можно обрабатывать без чрезмерных затрат на обработку данных. Эти данные, как правило, более полезны для многих приложений. Регулярная пространственная и временная организация наборов данных уровня 3 позволяет легко комбинировать данные из разных источников.

Хотя эти уровни обработки особенно подходят для типичных конвейеров обработки спутниковых данных, другие классификации уровней данных были определены и могут быть подходящими для гетерогенных рабочих процессов.

Данные дистанционного зондирования обрабатываются и анализируются с помощью программного обеспечения, известного как приложение дистанционного зондирования. Для обработки данных дистанционного зондирования существует большое количество патентованных приложений с открытым исходным кодом. Пакеты программного обеспечения дистанционного зондирования включают:

- ERDAS IMAGINE от Hexagon Geospatial (отделен от Intergraph SG & I);
- PCI Geomatica;

- TNTmips от MicroImages;
- IDRISI от Clark Labs;
- eCognition от Trimble;
- RemoteView от Overwatch Textron Systems;
- Dragon/ips, который является одним из старейших пакетов дистанционного зондирования, которые все еще доступны и в некоторых случаях бесплатны.

Программное обеспечение дистанционного зондирования с открытым исходным кодом включает в себя [41]:

- оптику (программное обеспечение);
- инструментарий Orfeo;
- платформу приложений Sentinel (SNAP) от Европейского космического агентства (ESA);
- другие, использующие возможности дистанционного зондирования и ГИС, представляют собой: GRASS GIS, ILWIS, QGIS и TerraLook.

Согласно опросам, проведенным Global Marketing Insights, Inc., наиболее часто используемые приложения среди азиатских академических групп, участвующих в дистанционном зондировании, являются следующие программные продукты: ERDAS 36 % (ERDAS IMAGINE 25 % и ERMapper 1 %); ESRI – 30 %; ИТТ визуальные информационные решения ENVI 17 %; MapInfo 17 %.

Среди западных академических респондентов: ESRI 39 %, ERDAS IMAGINE 27 %, MapInfo 9% и AutoDesk 7 % [41].

Главные преимущества ДЗ – высокая скорость получения данных о больших объемах атмосферы (или обширных областях земной поверхности), а также возможность получения информации об объектах, которые практически недоступны для исследований другими средствами. При традиционных метеорологических измерениях в верхних слоях атмосферы, выполняемых с помощью баллонных зондов, широко и систематически применяются сложные методы ДЗ. Исходя из этого, дистанционное зондирование довольно дорогое,

особенно космическое. Несмотря на это, сравнительный анализ затрат и полученных результатов доказывает высокую экономическую эффективность зондирования. Кроме того, использование данных зондирования, в частности метеорологических спутников, наземных и бортовых радиолокационных установок, спасло тысячи человеческих жизней, предотвращая стихийные бедствия и избегая опасных метеорологических явлений. Поэтому научно-исследовательская, экспериментальная, конструкторская и оперативная деятельность в области ДЗ, которая интенсивно развивается в ведущих странах мира, является полностью оправданной [5].

1.2 Зональные границы – экотоны

Экотон – это переходная область между двумя биомами. Именно там встречаются и интегрируются два или более сообществ. Он может быть узким или широким, местным (зона между полем и лесом) или региональным (переход между лесными и луговыми экосистемами).

Существует несколько отличительных особенностей экотона. Во-первых, он может иметь острый переход к растительности с четкой линией между двумя сообществами. Например, изменение цвета трав или растительности может указывать на экотон. Во-вторых, изменение физиогномики (внешний вид вида растений) может быть ключевым показателем. В-третьих, изменение вида может сигнализировать об экотоне. На разных сторонах экотона организмы будут отличаться.

Другие факторы могут иллюстрировать или скрывать экотон, например, миграцию и создание новых растений. Они рассматриваются как пространственные массовые эффекты, которые заметны, потому что некоторые организмы не смогут сформировать самоподдерживающиеся популяции, если они пересекут экотон. Если различные виды могут выживать в обоих сообществах двух биомов, то считается, что экотон обладает видовым

богатством. Наконец, обилие экзотических видов в экотоне может выявить тип биома или эффективность двух общин, разделяющих территорию.

Поскольку экотон – это зона, в которой смешиваются сообщества, разные формы жизни должны сосуществовать и соревноваться в природной среде. Таким образом, экотон может создавать своеобразную экосистему [27].

Экотонные полосы, как между различными типами растительности (лес – степь), так и ботанико (био) – географическими зонами (тундровая – лесная), всегда вызывали повышенный интерес исследователей. Не является исключением и экотон в горах между лесным и высокогорным (в широком понимании) высотными поясами [8].

Вопросы динамики северной (в горах верхней) границы лесов привлекают к себе внимание в связи с проблемой климатических изменений. Предполагаемое смещение границ распространения северных лесов рассматривается как одно из возможных последствий глобального потепления. Нечеткая их выраженность переводит эту проблему к оценке состояния переходной зоны между тундрой и тайгой (экотон тундра – тайга).

Лесотундровая зона окаймляет север России, протягиваясь на расстояние более 6 тыс. км. Структура растительности этой зоны зависит от того, леса какого породного состава выходят на их северные рубежи. Так, березовые редколесья Кольского полуострова и березово-еловые редколесья Севера Европейской России сменяются островами березовых, сосновых, еловых и лиственничных лесов в пределах Западной Сибири и постепенно переходят в лиственничные редколесья и редины в Центральной и Восточной Сибири. В итоге, этим меняется и структура растительности лесотундровой зоны [11].

Ширина полосы предтундровых редколесий варьирует от 40-60 км на Кольском полуострове до 120 км в средней части европейского Севера и 40-80 км в Предуралье. В Западной Сибири, где на северные рубежи выходят лиственнично-елово-кедровые северотаежные леса, а также участки сосновых и березовых лесов, им соответствуют лиственничные предтундровые редколесья, не образующие здесь сплошной зоны, а распространенные фрагментарно в

полосе шириной 80-160 км, расширяющейся в районе долины Енисея до 300 км.

В Центральной и Восточной Сибири на северные рубежи выходят преимущественно лиственничные северотаежные леса, сами по себе обычно редкостойные, к северу они сменяются предтундровыми редколесьями, в Центральной Сибири лиственничными с елью, а в Восточной – лиственничными. Они образуют сплошную полосу, имеющую в районе Хантайского прогиба ширину 80-300 км, в Анабарско-Ленском районе – 80 км, прерывающуюся на Яно-Индибирской низменности, где равнинные тундры контактируют с гольцово-тундрово-стланиково-редколесным таежным поясом хребтов Верхоянского и Черского. Эта полоса вновь расширяется на Колымской низменности до 100 км и смыкается с лиственничными редколесьями гор Северо-Востока России, переходными к горным тундрам. На Дальнем Востоке небольшие фрагменты равнинных редколесий сменяются горными редколесными и тундрово-редколесными спектрами с участием кедрового стланика [11].

Наиболее весомым фактором, который определяет показатели экотона, как и всех без исключения экологических систем, является климат.

Так, полученные данные о величине и скорости вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутых лесов на Полярном Урале свидетельствуют об интенсивной экспансии древесной растительности выше в горы в результате потепления и увлажнения климата, которые наблюдались в XX столетии. Климатическая граница, при которой возможно существование древесных растений, поднялась выше в горы примерно на 100 м, что в три раза превышает величину фактического вертикального сдвига верхней границы редколесий и сомкнутых лесов. Другими словами, в настоящее время древесная растительность еще не достигла климатически обусловленного предела из-за слабой обеспеченности семенами лиственницы тундровых участков, расположенных в верхней части

экотона верхней границы древесной растительности, хотя на некоторых участках склонов она и приблизилась к нему [3].

1.3 Анализ изменения границы лиственничного древостоя

Влияние климатического фактора на изменение границ лиственничные древостоев в горной местности довольно глубоко изучено Харуком В. И. и Имом С. Т. [9, 10, 23, 30]. Также, с использованием геоинформационных технологий, представлен анализ возраста древостоев некоторых экологических систем Сибири и качества условий развития. И особое внимание, в данном случае, необходимо уделить методам и методикам проведенных исследований, перевязывая это с полученными результатами.

Так, исследование [9] проводилось на основе анализа временного ряда космических снимков, цифровой модели рельефа и топографических карт. Использовались снимки Landsat-1/MSS (15.08.1973 г.) и Landsat-5/TM (10.07.2009 г.) с пространственным разрешением 60 и 30 м. Также использованы снимки американского военного спутника, работавшего в 1970-е годы, Hexagon (19.07.1976 г., имеющего пространственное разрешение 6 м) и Quickbird (31.07.2005 г., имеющего пространственное разрешение 0.6 м) [9].

Для анализа динамики состояния растительного покрова использовались 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.

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). 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 [9].

В дальнейшем, 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. Далее 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 ($R^2 = 0.75$) (1):

$$NDVI_{1973} = 0.896 NDVI_{2009} + 0.117 \quad (1)$$

Затем она была использована для калибровки. Классификационные картосхемы сгенерированы методом максимального правдоподобия.

Обучающие выборки были составлены на основе съемки сверхвысокого пространственного разрешения Quickbird, наземных фотографий и экспертных знаний. Всего сформировано 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 в [9] был использован тот же критерий расстояний, который использовался Шиятовым и др. в исследованиях Полярного Урала [21, 45]. Шиятов и др. считали сомкнутыми древостоями 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.

Снимок Hexagon был привязан к снимку Quickbird методом резиновой поверхности (использовано 6605 точек привязки).

Известно также, что пространственное слияние панхроматического снимка высокого разрешения с многоспектральным снимком низкого разрешения может существенно увеличить точность классификации [40]. Исходя из этого, в исследовании [9] 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 [28, 40, 49].

Далее были применены несколько масок для устранения из анализа следующих фоновых участков [9]:

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 использовался 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.

В конечном итоге авторами [9] идентифицировано четыре класса:

1. редколесья с сомкнутостью >0.2 ;

2. редины с сомкнутостью <0.2 и кустарники;
3. лишайниковая тундра;
4. каменистая тундра.

Точность классификации оценивалась методом каппа-статистики.

В источнике [9] также представлены результаты исследования связи изменений в распределении растительного покрова с элементами рельефа (высотой над уровнем моря, азимутальным направлением и крутизной склонов). Предварительно цифровая модель рельефа Aster GDEM была обработана для удаления ошибок и артефактов. Выделены высотные срезы по 50 м и 100 м (с 400 до 930 м над уровнем моря). Диапазон азимутов направлений склонов был разбит на 16 групп по 22.5° : северный (С, $348.75^\circ - 11.25^\circ$), северо-северо-восточный (ССВ, $11.25^\circ - 33.75^\circ$) и т.д.

$$K_{c(i)} = A_{c(i)} / B_{c(i)}, \quad (2)$$

где $c(i)$ – индекс, соответствующей i -й категории элемента рельефа c (высота над уровнем моря, 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.

Крутизна склонов была разбита по одному градусу. Распределение элементов рельефа с заданными высотами, азимутальным направлением и крутизной, как указано в [9], является неоднородным и поэтому может привести к невозможности проведения сравнительного анализа. Чтобы убрать неоднородность, данные были нормализованы методом, описанным в работах [31, 32]. Для нормализации покрытые участки леса с заданными азимутальным

направлением и крутизной склона, и высотой соотносились со всей анализируемой территорией с идентичными параметрами (2):

В [9] также были 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, в связи с этим, скорость распространения деревьев по градиенту высоты оценивалась косвенно. Алгоритм расчетов был следующий. Известно, что с ростом высоты над уровнем моря количество пикселей, соответствующих классам лиственничников, уменьшается. Первым шагом было создание таблицы, в которую были выписаны все значения высот и соответствующие им количества пикселей лиственничников. Далее в таблице происходил поиск значений высот, начиная с наибольшей высоты, которым соответствовало критическое количество пикселей лиственничников (100 = 0.36 га, 200 и 300 пикселей). Затем рассчитывалась разность между значениями найденных высот для 2005 г. и 1976 г. Например, по критерию 100 пикселей для классификации 2005 г. найдена максимальная высота в 858 м над уровнем моря, а для 1976 г. соответствующая высота равна 841 м над уровнем моря разность составляет 17 м, что соответствует 0.6 м/год [9].

Проанализирована динамика индекса вегетации 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 пиксела композитного изображения NDVI были посчитаны 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. [9].

Говоря об анализе климатических данных, на исследуемой территории 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 [9].

В конечном итоге это позволило установить, что 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 авторами [9] зоне (плато Путорана) антропогенное воздействие минимально. Наблюдаемые явления в основном связаны с климатическими изменениями. Рост среднегодовой температуры на 0.6 °С в течение последних трех деkad 20 века привел к продвижению границы леса по градиенту высоты не более чем на 15 м вверх, и появлению трех новых деревьев на 1 га.

Оценки скоростей роста деревьев с помощью геоинформационных технологий 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 уровнем моря деревья остаются в локальных депрессиях на крутых прогреваемых склонах (до 30°) юго-западной экспозиции [9, 46].

Согласно [15], климатические сценарии предсказывают к 2100 году возрастание температуры на +4 °С – +6 °С и осадков +25 % на севере Сибири, что может повлечь продвижение границы леса на север. Исходя из этого, реакция древесных растений будет наибольшей в экотоне лесотундры, где температура определяет их рост. Все более глубоко изучается процесс продвижения древостоев в тундру, как на северной, так и на высотной границах леса, а также увеличение сомкнутости притундровых лесов и увеличение радиального прироста деревьев в последние десятилетия.

В исследовании [10], объектом также была граница древесной растительности, на азиатском континенте сформированная лиственницей. Анализировались материалы съемок экотона лесотундры (переходной зоны между лесом и тундрой) на территорию, ограниченную 72°02'N и 72°40'N параллелями по широте, и 101°15'E и 102°06'E меридианами по долготе (общая площадь около 36 тыс. га). Исследуемая территория включала урочище Ары-Мас («лесной остров»), являющееся самым северным в мире древостоем (72°28' с.ш., 101°40' в.д.), а также лиственничники юго-восточных склонов, обращенных к р. Хатанга (участок «Хатанга»). Расстояние между этими участками составляет приблизительно 34 км: оба массива лиственничников имеют близкие эколого-лесоводственные характеристики.

Объект данного исследования сформирован лиственницей (*Larix gmelinii*); величина сомкнутости насаждений достигает 0,5, класс бонитета V_a-V_б. Климат региона резко континентален (коэффициент континентальности 232-251), количество осадков составляет около 250 мм/год, величина годового испарения – 50-100 мм. Продолжительность вегетационного периода – 32-65 дней, глубина сезонного оттаивания почвогрунтов достигает 50-70 см на минерализованных участках и 10-30 см – под моховым покровом [10, 17].

Материалы дистанционного зондирования (ДЗ) включали [10]:

- снимки "Landsat-MSS" и "Landsat-7";
- панхроматический космоснимок системы "Corona";
- панхроматические аэроснимки;

Все снимки и карты-схемы были переведены в единую равноугольную коническую проекцию Ламберта и привязаны к карте М 1:100000. Снимки с "Landsat-MSS" и "Landsat-7" были приведены к единому пространственному разрешению 60 м × 60 м (для интерполяции использовался метод ближайшего соседа) и дешифрировались по обучающим выборкам методом максимального правдоподобия. Предварительно проверялась нормальность распределения. В работе [10] использовались топокарты М 1:100000. Карты были отсканированы (с разрешением 300 dpi) и оцифрованы (с использованием программного

продукта Erdas 8.5). Векторный слой был создан в формате Arcview Shape (shp). Для получения растровой интерполированной цифровой модели рельефа (ЦМР, или 3D-модели) использовался программный продукт Golden Software Surfer 8. ЦМР была импортирована в Erdas и привязана к географическим координатам. По снимку системы «Corona» оценено положение границы лес-тундра, поскольку древесные растения выделяются на фоне снега по контрастной тени, чему способствуют низкие зенитные углы Солнца. Для отсечения территорий ниже (менее 5 м над уровнем моря) и выше (более 80 м) пределов произрастания лиственницы применялась матрица высот.

Наиболее ранние материалы о наземных исследованиях области лесотундры относятся к 1969 г. и представлены картой урочища Ары-Мас с описанием 12 пробных площадей. Материалы представлены геоботаническим, почвенными и таксационными описаниями, картой-схемой урочища Ары-Мас, характеристиками 12 пробных площадей (размером от 0,25 до 1,0 га) [10]. Повторные таксационные исследования были выполнены в 1989-1991 и 2000 годах. Для 10 площадей были получены материалы по динамике радиального прироста, на основе которых построено 10 хронологий.

Оценка влияния эколого-климатических факторов выполнялась по индексам ширины годичных колец (ИШГК), рассчитанным на основе хронологий. Данные по температуре и осадкам были получены на метеостанции «Хатанга», находящейся на расстоянии около 45 км от объекта исследования. К летнему периоду были условно отнесены июнь, июль, август; к зимнему – остальные девять месяцев. Весенняя и осенняя фенофазы (вследствие их кратковременности и значительной вариабельности начала и конца вегетации в высоких широтах) не выделились [10].

Для генерации обучающих и контрольных выборок использовалась обобщенная карта-схема типов лиственничников урочища Ары-Мас, составленная по материалам наземного обследования и дешифрирования аэрофотоснимков [36], а также аэрофотоснимки. Поскольку в определении «границы леса» в экотоне лесотундры имеется неопределенность [17, 34], в

данной работе лесные территории классифицировались по величине сомкнутости крон (СК):

- $СК < 0,1$ (редины);
- $0,1 < СК < 0,3$ (редколесья);
- $СК \geq 0,3$ (древостои);

К «фону» были отнесены тундры, болота, кустарники. Лиственничники Ары-Маса типологически весьма разнообразны: по данным наземных обследований выделено 18 классов. На исходной карте-схеме им соответствуют 88 контуров, снабженных лесоводственным и геоботаническим описаниями [10].

Кроме лиственничников, в пределах урочища выделено 8 классов тундр, 4 типа болот, ерники и ивняки (5 классов). Однако в целом площадь тундр и болот невелика, поэтому в качестве дополнительного источника для построения обучающих выборок для этих классов использовались топокарты М 1:100000, на которых тундры и болота широко отображены. В общей сложности было сформировано 35 классов; в дальнейшем они были генерализованы; результирующие классы, использованные для дальнейшего анализа в качестве обучающих выборок. В дальнейшем анализе классы 4-7 (тундры, болота, кустарники, комплекс болот, тундр и кустарников) были объединены в класс "фон" как территории; преимущественно не содержащие древесной растительности. Точность классификации оценивалась на основе матрицы ошибок и каппа-статистики [43].

Полученные в [10] данные указывают на возрастание сомкнутости древостоев в экотоне лесотундры и продвижение лиственницы в тундру, наблюдающиеся в последние три десятилетия. При этом наибольшие изменения наблюдаются в сомкнутости древостоев (площадь класса древостоев возросла на 66 %). Продвижение лиственницы в тундру является более инерционным процессом (3-11 м/год). Вероятная причина таких изменений – возрастание летних температур. Так, в последнее десятилетие 20-го столетия наблюдается положительный тренд июнь-августовских температур (уровень

достоверности 0.95 %). Ранее было показано, что на Полярном Урале за период с 1963 по 1988 гг. площадь насаждений с величиной сомкнутости 0,3 возросла примерно в 4 раза. В экотоне Ары-Мас за период с 1973 по 2000 годы площадь сомкнутых ($СК \geq 0.3$) насаждений возросла на 66 %; в последнем случае меньшие значения могут быть обусловлены более суровыми условиями произрастания. В то же время скорость продвижения лиственницы близка к таковой для Ары-Маса (3-10 м/год).

Продвижение деревьев в тундру, согласно [10], можно разделить на два основных типа:

- распространение от «материнской стены леса» на величину радиуса разлета семян;
- распространение от отдельных деревьев или стланиковых форм лиственницы, которые могут находиться на расстоянии до 1-3 км от материнского древостоя, «мозаичная» граница леса;

В ответ на потепление наблюдается как «диффузия» лиственницы в тундру, так и «растяжение» каждого элемента древесной мозаики. Вторая составляющая может значительно ускорить продвижение древесной растительности в тундру. Необходимо отметить, что на крайнем пределе своего произрастания древесная растительность приурочена к определенным формам ландшафта, защищающим ее от неблагоприятных условий – локальным депрессиям, ветрозащитным склонам. Поэтому экспансия растительности в зону тундры обычно связана с ее продвижением по высотному градиенту – вверх по склонам, в сторону наименее защищенных участков [10].

Анализ наземных данных (величин радиального прироста) показал, что наибольшая величина радиального прироста наблюдается в древостоях с минимальным проективным покрытием. При этом ежегодная вариабельность радиального прироста положительно коррелирует со среднемесячными летними температурами ($r = 0.65$, $t = 0.39$), и отрицательно – с летними ($r = -0.51$, $t = -0.41$) и зимними ($r = -0.70$, $t = -0.48$) осадками. Это, как указано в [10], объясняется уменьшением продолжительности солнечного сияния и

смещением даты схода снежного покрова: накопление дополнительного количества снега задерживает весеннюю фенофазу [35].

Это согласуется с данными космосъемки: прирост площадей сомкнутых древостоев происходит преимущественно за счет редиц и редколесий, а также фона, который на этапе классификации 1973 года включал определенное количество низко-сомкнутых насаждений. Другой вероятной причиной перехода класса фон в лиственничники является переход стланиковой формы лиственницы в вертикальную: вследствие развиваются способности нижних ветвей к укоренению, поскольку лиственничный стланик нередко состоит из нескольких стеблей, формирующих при благоприятных условиях куртины лиственниц. Продвижение лиственницы происходит по элементам ландшафта, на которых максимальна глубина оттаивания и минимальна величина проективного покрытия, а также имеются участки минерализованной поверхности. Такие участки благоприятны для прорастания семян лиственницы, поскольку на сомкнутом лишайниково-моховом покрове семена «зависают» над почвенным горизонтом [10].

Следовательно, наиболее «быстро» реагирует на изменения климата не положение границы леса, а величина сомкнутости (и непосредственно связанная с ней величина продуктивности) насаждений, формировавших границу леса до начала потепления [10].

Как указано выше, крутизна склона является одним из наиболее информативных признаков. Это обусловлено тем, что в экотоне лес-тундра деревья произрастают в крайне неблагоприятных условиях. При этом складки рельефа (крутизна является одной из характеристик «складчатости» рельефа) защищают древесные растения от неблагоприятных воздействий, например, от ветра. Последнее особенно важно в зимний период, поскольку ветер, наряду с метелевым переносом снега, вызывает диссикацию (обезвоживание и повреждение побегов). Таким образом, на примере самого северного в мире лесного массива показано возрастание величины сомкнутости и продвижение лиственницы в зону тундры в конце 20-го столетия. В то же время с юга и

запада наблюдается проникновение темнохвойных древесных пород (сосны сибирской, ели и пихты) в зону доминирования лиственницы [10].

1.3.1 Анализ изменения границы лиственничного древостоя за рубежом

За рубежом исследователи так же изучают смещение границы лиственничных древостоев, исследование, описанное в статье [44], говорит нам о том, что за рубежом так же основной причиной смещения является повышение температуры и влажности в определенных регионах. Исследователями рассматривались 83 публикации для различных территорий и ими были выделены основные территории с продвижением на север, этим территориям соответствуют и свои виды *Larix* (рисунок 4).

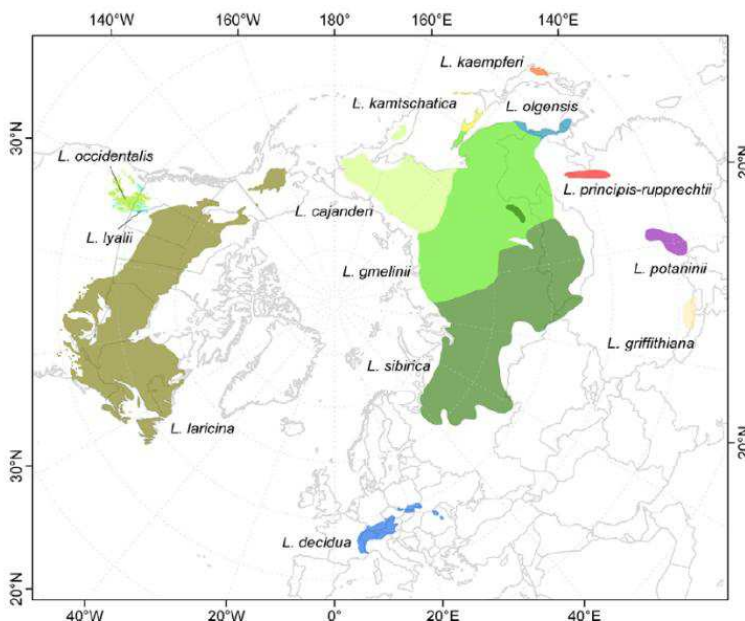


Рисунок 4 – Карта распространения видов *Larix*

Они брали во внимание, как широтные изменения, так и высотные (продвижение лиственницы вверх по склону), утолщение стволов, уплотнение существующих древостоев. Климатические данные использовались из набора данных Climate Research Unit (CRU TS 4.00; Harris, Jones, Osborn, & Lister,

2014), климатические данные доступные для периода с 1901 по 2015 года. Были произведены расчеты теплого периода (вегетационный период), эти данные были проанализированы в совокупности с составленными картами изменений границ древостоев и выявлено, что из 173 участков 63 % (109) участков с продвижением на север, 18 % (31) участок с отступанием границы на юг, и 19 % (33) были без изменений [44].

Главной причиной изменения климата, по мнению авторов исследования, является деятельность человека и как следствие образование парникового эффекта. Они выделили отступление на север южной границы древостоев в связи с увеличением засушливости южных районов. И продвижение северной границы на север с увеличением продолжительности теплого периода в суровых климатических условиях севера.

1.4 Прогнозирование

Опираясь на исследования [23], направленные на изучение лесов в горном хребте «Сенгилен» в русле изменения климата, границы, сложившиеся исторически и линия «самораспространившихся» деревьев использовались в качестве отправной точки для анализа климатического изменения древовидной структуры в течение последнего тысячелетия. Было установлено, что смертность деревьев наблюдалась во время «Малого ледникового периода» и наблюдалась за охлаждением с некоторой задержкой, но привела к регрессии количественных и качественных показателей дерева. Исследования возраста древостоев показали, что развитие более высокой растительности началось в конце девятнадцатого века и отставало от изменений температуры. Был восстановлен предел распределения деревьев, который в некоторых изученных пространственных точках находился ниже или выше исторической линии.

Восстановление сообществ лиственниц и сибирских сосен в настоящее время остается на высотах до 160 м над наблюдаемым максимальным снижением лесных насаждений в небольшой ледниковый период и превысило

его исторический максимум 90 м. Величина нисходящей и восходящей миграции лесной границы очень неоднородна и зависит от местных климатических условий и саморазрушения. В последние десятилетия, характеризующиеся потеплением, лиственница и сибирская сосна превратились в круммхольца (древесная растительность тундры и тайги до 2-3 м высотой, отличающаяся тем, что нижняя часть стволов деревьев простирается на землю, а верхняя часть направлена вертикально вверх) в виде древовидного роста [23].

Исследования [23] были проведены на хребте «Сенгилен», переходной зоне между бореальными лесами и монгольскими степями. Горный хребет «Сенгилен» располагается в горном регионе Алтай-Саян, который представляет собой систему хребтов с высотами до 4500 м, разделенных плотной дренажной сетью. Климат континентальный. В январе температура колеблется от -32 °С до -12 °С, а в июле колеблется от +9 °С до +18 °С. Количество осадков составляет ~ 390 мм.

Доминирующим видом является лиственница (*Larix sibirica*), смешанная с сибирской сосной (*Pinus sibirica*). Лиственница может пережить полупустынные осадки (около 250 мм в год), в то время как сибирская сосна нуждается в более высоком объеме влаги, достигая оптимального роста до 1000 мм влаги в год [29, 7]. Продолжительность жизни лиственницы и сибирской сосны в зоне исследования составляет 600-700 лет и 400-500 лет соответственно [23].

На границе древостоя лиственниц и сибирских сосен встречаются формы стволовые и стланиковые. Область исследования [23] включала верхнюю часть пояса экотона лесной и альпийской тундры. Экотон альпийского леса-тундра определяется как зона перехода между высотными границами подлеска и закрытым лесом. В 2007 году в семи профилях градиента в диапазоне высот 2100-2610 М.

Изменение трансектов по градиенту высоты была следующим образом: 150 м (раздел 1), 220 м (раздел 2), 170 м (раздел 3), 430 м (4-секции), 119 м

(раздел 5), 75 м (раздел 6) и 130 м (раздел 7). Для каждого поперечного сечения отмечались следующие границы леса:

- текущий предел размещения, соответствующий верхней границе современных деревьев (т. е. около 30 лет);
- старинная (или беженская), которая была отмечена верхней границей деревьев в возрасте 250 лет;
- историческая граница древостоев, которая определяется как самый высокий известный предел древостоев до «Малого ледникового периода».
- граница подроста, соответствующий верхней границе деревьев около 30 лет.

Координаты широты и долготы, высота границы древостоя и граница подроста были измерены с помощью глобальной системы определения местоположения (GPS) (точность 95 м). Возраст субфоссильных деревьев был определен с помощью мастер-хронологии [31], которая была создана на основе 26 субфоссильных и 8 живых лиственничных деревьев и охватывала период 1904-2006 годов. Средние значения хронологической корреляции и чувствительности равнялись 0,66 и 0,33 соответственно. Программы COFESHA [33] и TSAP [42] были использованы для обнаружения двойных и отсутствующих колец.

Исследование показало, что субфоссильные деревья были в хорошем состоянии, то есть они не теряли внешние темные круги деревьев. Сохранение древесины было объяснено, согласно исследованиям [23], по нескольким причинам. Во-первых, из-за низких летних осадков (около 150 мм) упавшие деревья опираются на сухие скалистые поверхности и разлагаются намного дольше. Было также отмечено, что деревья, упавшие под экотоном лесной тундры и в отдаленных районах с хорошо развитой почвой, частично гниют и не поддаются анализу. Во-вторых, упавшие деревья подвергаются меньшему механическому повреждению в снегу, что является основной причиной потери обломков, чем стоячие деревья [23].

Состав видов и возрастная структура регенерации изучались в пределах 10×10 м (n=36) в лесном тундровом экотоне.

Регенерация определяется как деревья высотой около 2,5 м. Это определение принято, потому что этот интервал высоты может включать даже преждевременные деревья. Возраст регенерации определяется путем подсчета колец роста у основания дерева. Регенерация была разделена на группы жизнеспособных, нежизнеспособных и мертвых деревьев. Жизнеспособная регенерация включала здоровые деревья (без признаков подавления или повреждения) и поврежденные, но жизнеспособные деревья (например, поврежденные вершины или замененные стабильными или прогрессивными верхушечными Ростами). Деревья старше 30 лет были исключены из анализа регенерации. В результате размер выборки включал 67 лиственниц и 45 образцов сибирской сосны, а также 60 сибирских сосен и лиственницы нежизнеспособных или мертвых образцов [23].

Программное обеспечение Excel и программное обеспечение StatSoft были использованы для статистического анализа. Данные о температуре и осадках были получены учеными Митчеллом и Джонсом [38]. Этот источник информации предоставляет средние метеорологические данные по сетке 0,5 градуса (или 3 555 км). В этом районе средняя высота составляла около 2300 м [23].

Как указано в исследовании [18], цифровые изображения Земли, полученные путем сканирования радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, на спутниках NOAA) и MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, на спутнике «Terra»), имеют преимущество высокой видимости и частоты. Обобщение предметов (250, 500, 1000 кв. км в надире) отвечает, прежде всего, за картографирование обзора. Одной из особенностей такого рода обследований является способность анализировать не только нынешнюю структуру, но и функционирование наземных экосистем на глобальном и региональном уровнях. Можно увидеть дифференциацию территории на основные классы зон, а также следить за сезонными

изменениями природных процессов (растительность, повышенная опасность пожара, засуха и т.д.).).

В ходе исследований было проведено картирование зональных категорий почвы и растительного покрова испытательного полигона в низких горах Саяна (16,2 тыс. га) на основе данных со спутников NOAA и Terra. Данные, полученные радиометрами в видимом (~0,6 мкм) и ближайшем инфракрасном (~0,9 мкм), были наиболее информативными в классификации. Однако некоторые характеристики различных формаций лесного покрова наблюдались с использованием информации в тепловом диапазоне (~12 мкм), так как дифференциация покрова в больших зональных классах во многом определяется ежегодным изменением температур и соотношением тепла и влажности [18].

Исходя из этого, в исследовании [14], спутниковые изображения позволили выделить два высокогорных поясных комплекса (ВПК):

- темные хвойные леса, в которых доминируют пихта (*Abies sibirica*) и кедр (*Pinus sibirica*);
- хвойные легкие преобладают сосны, а также лиственницы, березы и осины (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *Betula pendula*, *Populus tremula*).

При решении проблем дистанционного зондирования Земли по классификации Е. Л. Кримова [12] леса относятся ко второму классу ландшафтных объектов (растительности).

В соответствии с классификатором тематических задач оценка природных ресурсов и окружающей среды, решается с помощью материалов дистанционного зондирования для решения проблем лесного отдела в намеченных целях с использованием космического дистанционного зондирования со спектральным диапазоном 0,4-1,1 мкм, поскольку считается наиболее подходящим (видимым и ближним инфракрасным). Требования к материалам дистанционного зондирования с разрешением 170, 30 и 5-15 м. На основе пространственных изображений формируются тематические картографические результаты в виде лесохозяйственных материалов для слоя

защитных площадок, оперативных и резервных лесозаготовок 1:25000, 1:50000, 1:200000 и 1: 1000000.

Частота опроса и степень разрешения зависят от типа леса и его географического местоположения, интенсивности эксплуатации и объекта картографических документов. По некоторым оценкам, периодичность может составлять от 1 до 5 лет. Решение проблем требует ретроспективной базы данных изображений и результатов их обработки [19].

В целом можно отметить, что изучение северных границ лиственниц с помощью методов дистанционного зондирования сегодня является одним из самых сложных и интегральных. Это связано с тем, что производственные и морфологические параметры растительности формируются под влиянием всех без исключения факторов окружающей среды (включая синергетическое и кумулятивное воздействие факторов), а использование ГИС позволяет быстро, точно и масштабно анализировать их.

[Глава 2 – изъята]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале 21 века наблюдается неоднородное смещение северной границы лиственничных древостоев на север (до 400 км). Это связано с возрастанием сомкнутости в редколесьях в связи с увеличением температуры воздуха начиная с 1980-х годов. Повышение температуры способствует более быстрому и эффективному росту лиственницы на севере. Другими исследователями так же подтверждалось продвижение лиственницы на север в зону тундр [9, 10, 23, 30, 44].

Увеличение температуры за период с 1980 по 2016 год, является ключевым фактором роста лиственницы, в связи с чем, мы наблюдаем продвижение границы древостоев на север, однако некоторыми исследователями [44] отмечается отступление южной границы на север, что связано с увеличением засушливости, опять же вызванного увеличением средних летних температур. При сохранении текущих трендов продвижение границы продолжится при увеличении темпов продвижения до перехода предела, когда северный климат станет слишком засушливым для произрастания лиственницы, т.е. несмотря на продвижение северной границы, южная граница может достигнуть побережья северного ледовитого океана, через достаточно большой промежуток времени.

Данное исследование подтвердило наличие динамики лиственничных древостоев на севере территории России, показало возможность изучения данного вопроса при помощи ГИС технологий. Применение ГИС ни в коем случае не может рассматриваться как единственно верный метод исследования, поскольку он основывается на большом объеме полевых и лабораторных исследований, методы проведения которых, являются не менее важными. Стоит отметить то, что северные (арктические и субарктические) области остаются малоизученными в силу суровых климатических и природных условий. Поэтому использование дистанционного зондирования для исследования этих территорий представляется актуальной и необходимой научной задачей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобров, Е. Г. История и систематика лиственниц / Е. Г. Бобров.– Санкт–Петербург : Наука, 1972.– 96 с.
2. Бурша, М. Основы космической геодезии / М. Бурша; под. ред. А. В. Буткевича. – Москва : «Недра», 1975. – 280 с.
3. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале / С. Г. Шиятов, М. М. Терентьев, В. В. Фомин, Н. Е. Циммерманн // Экология. – 2007. – №4 – С. 1–6.
4. Дистанционное зондирование Земли. [Электронный ресурс] : база данных содержит информацию о российских космических системах. – Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru>
5. Дистанционное зондирование. [Электронный ресурс] : электронный журнал об авиации. – Режим доступа: <http://avia.pro>
6. Дистанционное зондирование. [Электронный ресурс] : электронный словарь, содержит термины и определения. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru>
7. Жуков, А. Б. Леса СССР / А. Б. Жуков. – Москва : Наука, 1969. – Т. 4. – 767 с.
8. Зибзеев, Е. Г., Седельников, В. П. Структура экотона между лесным и высокогорным поясами гор Южной Сибири / Е. Г. Зибзеев, В. П. Седельников // Растительный мир Азиатской России. – 2010. – Т.6, №2. – С. 46–49.
9. Им, С. Т., Харук, В. И. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры плато Путорана / С. Т. Им, В. И. Харук // Исследование Земли из космоса. – 2013. – №5. – С. 32–44.
10. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры / В. И. Харук [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2005. – №6. – С. 46–55.

11. Кравцова, В. И. Методические подходы в аэрокосмических исследованиях динамики северной границы леса / В. И. Кравцова // География и природные ресурсы. – 2012. – №3 – С. 133–139.
12. Кринов, Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е. Л. Кринов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1947. – 138 с.
13. Крэкнелл, А. П. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии / А. П. Крэкнелл; перевод с английского К. Н. Лаврова, С. И. Щетилова, А. Д. Терехова. – Москва : Мир, 1984. – 547 с.
14. Мильков, Ф. Н. Природные зоны СССР [Текст] / Ф. Н. Мильков. – Издание второе, дополненное и переработанное. – Москва : Мысль, 1977. – 292 с.
15. Милютин, Л. И. Биоразнообразие лиственниц России / Л. И. Милютин // Хвойные бореальной зоны.– 2006.– №1.– С. 6 – 9.
16. Мишев, Д. Дистанционные исследования Земли из космоса / Д. Мишев. – Москва : Мир, 1985. – 230 с.
17. Норин, Б. Н. Ары–Мас : природные условия, флора и растительность / Б. Н. Норин. – Ленинград : Наука, 1978. – 190 с.
18. Применение данных дистанционного зондирования для анализа состояния и нарушенности лесного покрова, вызванного антропогенными и естественными факторами / А. И. Сухинин [и др.] // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – С. 78–80.
19. Пудовкин, О.Л. Дистанционное зондирование Земли из космоса: прикладные задачи лесного хозяйства. [Электронный ресурс] : электронная книга. – Режим доступа: <http://magru.net>
20. Сукачев, В. Н. К истории развития лиственниц./ В. Н. Сукачев // Лесное дело. – 1924. – С. 12–44.
21. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin, N. E. Zimmermann // Russian Journal of Ecology. – 2007. – Volume 38, Issue 4. – P. 223–227.

22. ClimateDataGuide [Электронный ресурс] : база данных содержит подробную информацию о продукции CRU TS. – Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu>.
23. Climate-induced mountain tree-line evolution in southern Siberia / V. I. Kharuk, S. T. Im, M. L. Dvinskaya, K. J. Ranson // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2010. – Volume 25, Issue 5. – P. 446 – 454.
24. Crudata [Электронный ресурс] : база данных содержит обзор продукции CRU TS. – Режим доступа: <https://crudata.uea.ac.uk>.
25. Earth observing system: report of the EOS data panel : Data and information system / ed. by NASA. – NASA, 1986. – 49 p.
26. Earthdata [Электронный ресурс] : база данных содержит информацию о продукции MCD12Q1. – Режим доступа: <https://earthdata.nasa.gov>.
27. Ecotone [Электронный ресурс] : электронная энциклопедия. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org>.
28. ERDAS Field Guide : field guide / USA : ERDAS, Inc., 2010. – 842 p.
29. Foliar carbon isotope discrimination in Larix species and sympatric evergreen conifers: A global comparison / B. D. Kloeppel, S. T. Gower, I. W. Trechel, V. I. Kharouk // *Oecologia*. – 1998. – Volume 114, Issue 2. – P. 153–159.
30. Forest-tundra larch forests and climatic trends / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, S. T. Im, M. M. Naurzbaev // *Russian Journal of Ecology*. – 2006. Volume 37, Issue 5. – P. 291–298.
31. Fritts, H. C. Reconstruction large-scale climatic patterns from tree-ring data : A diagnostic analysis. / H. C. Fritts. – Tucson : University of Arizona Press, 1991. – 286 p.
32. Grigoriev, A. N. Method of radiometric distortion correction of multispectral data for the earth remote sensing / A. N. Grigoriev // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2015. – Volume 15, Issue 4. – P. 595–602.

33. Holmes, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement / R. L. Holmes // *Tree-Ring Bulletin*. – 1983. – vol. 43. – P. 69–78.
34. Hustich, I. The boreal limits of conifers/ I. Hustich // *Arctic*. – 1953. – Volume 6. – P. 149–162.
35. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in sub- arctic Eurasia / E. A. Vaganov [et. al.] // *Nature*. – 1999. – Volume 400. – P. 149–151.
36. Kharuk, V. I., Fedotova, E. V. Forest-tundra ecotone dynamics / V. I. Kharuk, E. V. Fedotova // *Arctic environment variability in the context of global change* / L. P. Bobylev, K. Y. Kondratyev, O. M. Johannessen. Heidelberg. – Springer-Practice, 2003. – P. 281–299.
37. Mills, J. P., Newton, I., Twiss S. D. Photogrammetry from Archived Digital Imagery for Seal Monitoring / J. P. Mills, I. Newton, S. D. Twiss // *The Photogrammetric Record*. – 1997. – Volume 15, Issue 89. – P. 715–724.
38. Mitchell, T. D., Jones, P. D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids / T. D. Mitchell, P. D. Jones // *International Journal of Climatology*. – 2005. – Volume 25, Issue 6. – P. 693–712.
39. Parkinson, C. L., Ward, A., King, M. D. *Earth Science Reference Handbook : A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions* / C. L. Parkinson, A. Ward, M. D. King. – Washington : NASA, 2006. – 290 p.
40. Phol, C., van Genderen, J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications / C. Phol, J. L. van Genderen // *International Journal of Remote Sensing*. – 1998.– Volume 19, Issue 5. – P. 823–854.
41. Remote sensing. [Электронный ресурс] : электронная энциклопедия. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org>
42. Rinn, F. TSAP V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation / F. Rinn. Germany, Heidelberg, 1996. – 263 p.
43. Rosenfield, G. H., Fitzpatrick-Lins, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy / G. H. Rosenfield, K. Fitzpatrick-Lins //

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1986.– Volume 52, Issue 2. – P. 223–227.

44. Shifting global Larix distributions: Northern expansion and southern retraction as species respond to changing climate / S. D. Mamet, C. D. Brown, A. J. Trant, C. P. Laroque // Journal of Biogeography. – 2018.

45. Shiyatov, S. G., Terent'ev, M. M., Fomin, V. V. Spatiotemporal dynamics of forest&tundra communities in the Polar Urals / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin // Russian Journal of Ecology. – 2005. – Volume 36, Issue 2. – P. 69–75.

46. Spatial distribution and temporal dynamics of high–elevation forest stands in southern Siberia / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, S. T. Im, A. S. Vdovin // Global Ecology and Biogeography. – 2010. – Volume 19, Issue 6. – P. 822–830.

47. SPEI [Электронный ресурс] : база данных содержит файлы климатических данных покрывающих всю территорию планеты. – Режим доступа: <http://spei.csic.es>

48. Twiss, S. D., Pomeroy, P., Thomas, C. J. Topographic spatial characterisation of grey seal Halichoerus grypus breeding habitat at a sub–seal size spatial grain / S. D. Twiss, P. Pomeroy, C. J. Thomas // Ecography. – 2001. – Volume 24, Issue 3. – P. 257–266.

49. Welch, R., Ehlers, W. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data / R. Welch, W. Ehlers // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1987. – Volume 53, Issue 3. – P. 301–303.

[Приложение А – изъято]

[Приложение Б – изъято]

[Приложение В – изъято]

