

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук
« ____ » _____ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Применение ГИС-технологий для изучения динамики восстановления
темнохвойных древостоев в очагах массового размножения сибирского
шелкопряда

09.04.01 Информатика и вычислительная техника

09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	_____	_____	Е.В. Федотова
Выпускник	_____		Г.О. Матвеевичев
Рецензент	_____	_____	С.Т. Им
Нормоконтролер	_____		Е.В. Федотова

Красноярск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Повреждение лесного покрова сибирским шелкопрядом и восстановительные сукцессии	6
1.1 Причины вспышки численности сибирского шелкопряда	6
1.2 Восстановительные сукцессии	8
2 Обзор литературы по использованию данных дистанционного зондирования для анализа лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом и восстановлению лесного покрова.....	11
2.1 Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири.....	11
2.2 Анализ пространственной приуроченности очагов повреждения таежных лесов сибирским шелкопрядом по данным мелкомасштабного дистанционного зондирования	13
2.3 Съемка Spot-Vegetation в анализе динамики повреждения горно-таежных лесов сибирским шелкопрядом.....	16
2.4 Формирование лесов на шелкопрядниках. Картирование возрастных стадий лесной растительности.....	18
2.5 Исследуемая территория	19
3 Исходные данные.....	22
3.1 Характеристики приборов дистанционного зондирования Земли, используемых в работе	22
3.2. Карта растительного покрова Российской Федерации	24
4 Методы анализа данных	26
4.1 Алгоритмы кластеризации данных дистанционного зондирования Земли.....	26
4.2 Кластеризация снимков 1976-1977 года с прибора Landsat 2 MSS .	28

4.3 Кластеризация снимков 2017 года с прибора Landsat 8 OLI.....	28
5 Анализ данных дистанционного зондирования.....	30
5.1 Программное обеспечение, используемое в работе	30
5.1.1 Программный пакет ENVI	30
5.1.2 Программный пакет ArcGIS	31
5.2 Предварительная обработка данных дистанционного зондирования	32
5.3 Кластеризация космических снимков.....	34
5.3.1 Кластеризация снимков 2017 года полученных, с прибора Landsat 8 OLI	34
5.3.2 Кластеризация снимков 1977 года, полученных с прибора Landsat 2 MSS.....	36
6 Результат работы.....	38
6.1 Состояние лесного покрова на исследуемой территории в 1976-1977 году.	38
6.2 Состояние лесного покрова на исследуемой территории в 2017 году	39
Заключение	43
Список использованных источников	44

ВВЕДЕНИЕ

Сибирский шелкопряд является одним из наиболее опасных вредителей тайги, поскольку в периоды вспышек массового размножения он заселяет сотни тысяч гектаров лесов и сильно их повреждает [11]. Более того, он является постоянно действующим фактором в хвойных древостоях Сибири, которые восстанавливаются после его нападения медленно и плохо. Наибольший ущерб шелкопряд причиняет лесам с преобладанием пихты сибирский, менее устойчивой к повреждениям и не регенерирующей хвою после ее объедания гусеницами. Данные по характеру восстановления и формирования леса на шелкопрядниках в пихтовых лесах весьма ограничены (на момент написания статьи в 2001 г.) [11].

В данной работе анализируются последствия массового размножения сибирского шелкопряда, имевшее место в 1952-1957 гг. на территории Кеть – Чулымского междуречья. В результате вспышки усохло около 1,5 млн га темнохвойных лесов, причем в погибших древостоях [13] по данным к 1966 году в большинстве случаев отсутствует удовлетворительное возобновление не только хвойных, но и лиственных пород.

Вспышка в Кеть – Чулымском междуречье была выбрана как объект исследования, поскольку период, прошедший после нее, достаточен для оценки восстановительной сукцессии. Также для исследуемой территории возможно построить ряд данных дистанционного зондирования Земли, по которым отследить динамику восстановления темнохвойных древостоев в очагах массового размножения сибирского шелкопряда. Важно знать, какими ГИС технологиями можно решать такие задачи, чтобы в дальнейшем использовать их для составления прогнозов восстановления лесного покрова после его повреждения сибирским шелкопрядом.

Цель магистерской диссертации - оценить динамику восстановления темнохвойных лесов, пораженных в результате вспышки сибирского шелкопряда в 1952-1957 годах на территории Кеть – Чулымского междуречья.

Для достижения данного результата необходимо решить следующие задачи:

- выполнить обзор литературы по использованию данных дистанционного зондирования для анализа лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом, и процессов восстановления лесного покрова;

- подготовить материалы для выполнения работы (отбор космо-снимков, информации о составе лесов на исследуемой территории, оценки применимости методов анализа);

- провести анализ данных дистанционного зондирования для оценки восстановительного процесса лесного покрова;

- создать тематические карты лесных формаций на данной территории за время после вспышки сибирского шелкопряда.

1 Повреждение лесного покрова сибирским шелкопрядом и восстановительные сукцессии

1.1 Причины вспышки численности сибирского шелкопряда

Сибирский шелкопряд является основным лесным вредителем в азиатской части России, также одним из наиболее опасных насекомых-вредителей хвойных лесов, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке. Вспышки наблюдаются с периодичностью 15- 25 лет [1].

Существует несколько теорий о начале вспышки численности. Первая, вследствие, двух или трех засушливых летних сезонов, в период которых сибирский шелкопряд может отложить яйца два или три раза в течении года. Другое предположение связывает начало вспышки численности с весенними низовыми пожарами, в результате которых погибает естественный враг шелкопряда. Еще одна причина связана с человеческой деятельностью, такими как вырубки, затопления, осушения болот и тому подобное, могут стать причиной вспышки численности. В результате могут быть уничтожены большие количества основных врагов [2].

Сибирский шелкопряд распространен на территории Уральского, Западно-Сибирского, Восточно-Сибирского и Дальневосточного регионов [3].

Цикличность массовых размножений - одна из характерных особенностей популяционной экологии сибирского шелкопряда. Причины циклических изменений численности насекомых многообразны - от прямого и косвенного влияния модифицирующих факторов до сложных взаимодействий фитофагов с кормовой породой и естественными врагами. Благодаря механизмам авторегуляции, эти взаимодействия трансформируются на уровне популяции в закономерные циклы, включающие не только динамику численности и плотности населения, но и адаптивные сдвиги в демографической структуре популяции, ее генетическом составе, интенсивности размножения [9].

Закономерный характер развития вспышки массового размножения во времени и пространстве детерминирует прохождение пяти последовательных фаз: нарастания, максимума, разреживания, депрессии и восстановления численности [9].

Лесоэкологические условия и региональная специфика трофических связей существенным образом влияют на продолжительность и периодичность градаций шелкопряда. В пихтовых лесах вспышки массового размножения отличаются высоким уровнем интенсивности и скоротечностью градационных процессов: интенсивный подъем численности до максимума проходит в течение 3-5 лет и столь же быстро снижается (2-4 года). При проведении крупномасштабных лесозащитных обработок насаждений темп спада численности резко усиливается. Средняя продолжительность вспышки в пихтовых лесах составляет 10 лет. За этот период проходит развитие 7 доминантных поколений шелкопряда, из которых минимум 2 поколения развиваются по однолетнему циклу. В лиственных лесах развитие вспышек нередко принимает затяжной характер и продолжается 16-20 лет [9].

Пространственно - временная картина развития вспышки массового размножения сибирского шелкопряда тесно связана с миграциями, которые функционально скоррелированы с плотностью популяций и служат своеобразным внутривидовым механизмом регуляции численности. Миграции обуславливают выход популяций вредителя из - под контроля энтомофагов, снижают конкуренцию, ускоряют темп развития и затухания очагов, а, следовательно, продолжительность и интенсивность вспышек массового размножения [9].

Познание природных закономерностей, которым подчиняется динамика популяций сибирского шелкопряда, совершенно необходимо для разработки эффективных методов прогнозирования и обоснования оптимальной системы лесозащитных мероприятий, обеспечивающих своевременное выявление и локализацию очагов на ранних этапах вспышек массового размножения. Это позволит перейти к экологически обоснованному ограничению

крупномасштабных авиахимических и авиабактериологических обработок таежных лесов и конструктивной оценке лесохозяйственной и экономической эффективности лесозащитных мероприятий [9].

1.2 Восстановительные сукцессии

Сукцессия (преемственность, наследование) — это постепенная, необратимая, направленная смена одних биоценозов (исторически сложившаяся совокупность животных, растений, грибов и микроорганизмов, населяющих относительно однородное жизненное пространство, и связанных между собой окружающей их средой.) другими на одной и той же территории под влиянием природных факторов или воздействия человека [4] (рисунок 1).



Рисунок 1 - Временной период сукцессии и типы подстилающей поверхности

Первичная сукцессия - развитие сообществ, образовавшихся на ранее не заселенных местообитаниях, где растительность отсутствовала — на песчаных дюнах, застывших потоках лавы, породах, обнажившихся в результате эрозии или отступления льдов.

Вторичная сукцессия – местности, где ранее существовала растительность, но по каким-либо причинам она была уничтожена, ее естественное восстановление — частичное уничтожение леса болезнями, ураганом, извержением вулкана, землетрясением либо пожаром.

Восстановление после таких катастрофических воздействий происходит в течение длительного времени [4].

Вспышка численности сибирского шелкопряда на значительных площадях приводит к существенному изменению лесного состава, усыханию древостоев и дают толчок к процессу вторичной сукцессии.

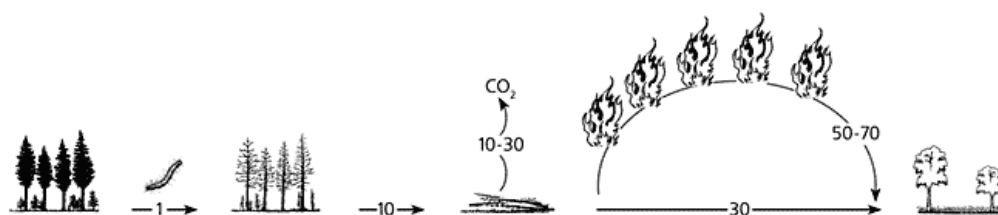
Основной причиной отсутствия естественного возобновления в шелкопрядниках является резкая экологическая трансформация растительных сообществ. Во время вспышки за 3-4 недели в подстилку и почву поступает до 30 тыс. га объединенных фрагментов хвои, экскрементов и трупов гусениц. Буквально в течение одного сезона вся хвоя в насаждении перерабатывается гусеницами и поступает в почву. Этот опад содержит значительное количество органических веществ – благоприятного корма для почвенных бактерий и грибов, деятельность которых значительно активизируется после массового размножения шелкопряда [5].

Этому также способствует увеличение температуры и влажности почвы, поскольку ни солнечный свет, ни осадки более не задерживаются кронами деревьев. Фактически, массовое размножение шелкопряда способствует более интенсивному протеканию биологического круговорота в результате быстрого освобождения значительных количеств вещества и энергии, заключенных в лесной подстилке [5].

Почва в шелкопрядниках становится более плодородной. На ней бурно развивается светолюбивый травяной покров и подлесок, происходит интенсивное задернение и часто – заболачивание. Вследствие этого сильно нарушенные насаждения сменяются нелесными экосистемами. Поэтому восстановление насаждений, близких к исходным, затягивается на неопределенный срок, но не менее чем на 200 лет [5].

Необходимо 10-20 лет, чтобы микроорганизмы разрушили остатки древесины и постепенно освободилось место для молодых берез. Однако в большинстве случаев росту нового поколения деревьев препятствуют пожары.

Известно, что шелкопрядники горят по несколько раз, поэтому пока в бывшем очаге остаются горючие остатки, деревья там не растут (рисунок 2).



Цифрами обозначено количество лет, необходимое для сукцессии.

Рисунок 2 – Смена растительности в таежной экосистеме

Фактически в течение первых трех десятков лет шелкопрядники не производят древесину. Лишь после исчезновения пожарной опасности начинается рост березы, а вслед пихты.

2 Обзор литературы по использованию данных дистанционного зондирования для анализа лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом и восстановлению лесного покрова

2.1 Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири

В статье [6] исследована применимость съемки Landsat в анализе индуцированных сибирским шелкопрядом сукцессий в темнохвойных формациях Южной Сибири (Кеть-Чулымское междуречье). В Кеть-Чулымском междуречье в 1953-1957 гг. леса были повреждены на территории 1,5 млн га. Дешифрованы материалы съемки, выполненной в период с 1980 по 2000 год [6].

По материалам съемок разных лет реконструирована последовательность событий, произошедших после повреждения лесов шелкопрядом. На шелкопрядниках Кеть-Чулымского междуречья использовались три “временных среза”: 1980, 1990 и 2000 годы [6].

В работе использованы данные космической съемки со спутников системы «Ресурс», Landsat-4 и Landsat-7, выполненной в летний период 1980, 1990 и 2000 годов. Анализировался участок, ограниченный с юга и севера $56^{\circ}45'$ и $57^{\circ}06'$ параллелями, а с запада и востока - $91^{\circ}56'$ и $92^{\circ}33'$ меридианами (рисунок 3). В пределах этого участка выделено два очага повреждения, которые четко выделяются на снимках. Участок расположен в междуречье Кети и Малого Кемчуга. Рельеф района представлен плоскими равнинами с абсолютными высотами 150—200 м, сложенными элювиально-делювиальными отложениями [6].

Основной фон почвенного покрова представлен дерново-подзолистыми почвами со вторым гумусовым горизонтом, различной степени оподзоленности. Почвы дренированных речных долин отличаются слабым глубинным оглеением [6].

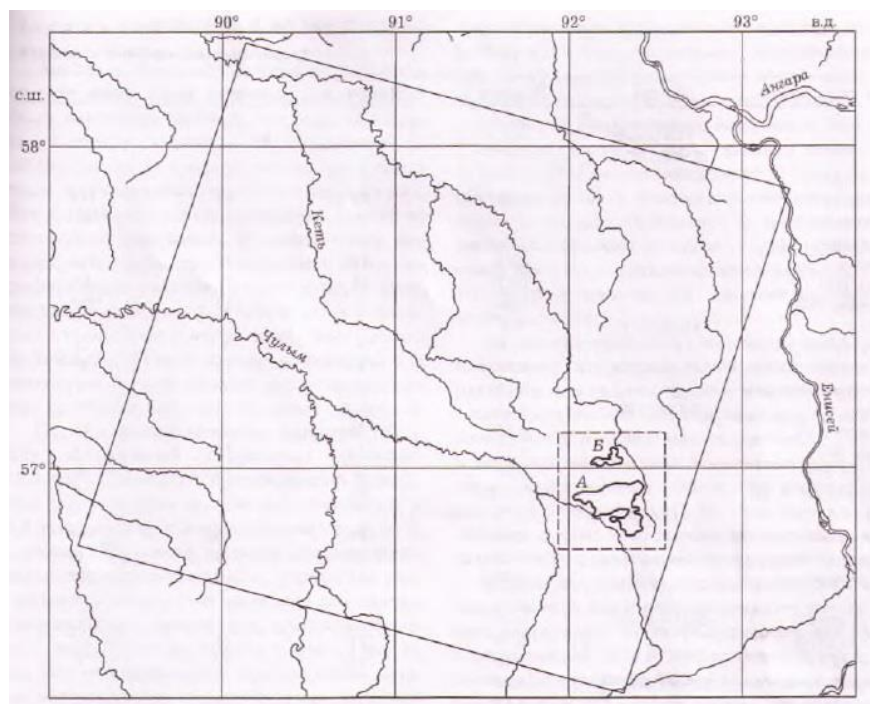


Рисунок 3 – Очаги массового размножения сибирского шелкопряда в Кеть – Чулымском междуречье, вспышка 1953-1957 гг.
 А – шелкопрядник площадью 20 тыс. га, Б – шелкопрядник площадью 3 тыс. га.

Материалы съемки Landsat анализировали с помощью пакета программного обеспечения ERDAS Imagine 8.4. Методика обработки изображений состояла из следующих этапов: первичная обработка, классификация методом максимального правдоподобия. Размер сцены для системы Landsat составляет 185x185 км, наземное разрешение – 30 м. Дешифрирование снимков системы Landsat проводилось при использовании всех семи каналов. В качестве обучающих выборок при дешифрировании изображений и тестовых участков для оценки точности получаемой классификации использовали данные наземных обследований и планы лесонасаждений Красноключинского, Верхне-Казанского и Мостовского лесничеств Большемуртинского лесхоза [6].

Разделимость обучающих выборок определялась по расстоянию Джеффриса-Матусита. В качестве критериев различия анализируемых элементов ландшафта использовали их спектральные сигнатуры и

нормализованную разность вегетационного индекса. Последняя определяется соотношением

$$NDVI = \frac{I_{ir} - I_r}{I_{ir} + I_r}, \quad (1)$$

где I_r , I_{ir} — величины сигналов в третьем (0,58-0,68 мкм) и четвертом (0,72-1,1 мкм) каналах Landsat соответственно.

Точность классификации оценивалась сопоставлением с материалами наземных обследований. После получения достоверной классификации были выделены контуры шелкопрядников и в их пределах подсчитаны площади каждого выделяемого класса [6].

2.2 Анализ пространственной приуроченности очагов повреждения таежных лесов сибирским шелкопрядом по данным мелкомасштабного дистанционного зондирования

Практический интерес представляет исследование возможностей применения данных мелкомасштабной съемки для целей мониторинга вспышек массового размножения насекомых-вредителей, так как материалы на территорию очага можно получать не реже одного раза в сутки. Ограничение в данном случае связано с пространственным разрешением этой съемки: массивы поврежденных насаждений должны иметь площадь не менее сотни гектаров [1].

Цель работы состояла в том, чтобы по материалам мелкомасштабных съемок NOAA AVHRR и MODIS выделить леса, поврежденные в 1994-1996 годах сибирским шелкопрядом в Нижнем Приангарье и, используя цифровую модель рельефа, определить особенности расположения таких лесов по элементам рельефа (высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склонов) [1].

Три снимка NOAA AVHRR использовались для изучения динамики повреждения лесов в течение одного вегетационного периода: 1 - 07.06.1995 г., 2 - 30.06.1995 г., 3 - 16.08.1995г. Для картирования всех пострадавших от шелкопряда лесов использованы два типа продуктов MODIS. Во-первых, это 16-дневный композит (MODIS13) 12-28 августа 2000 г. Изображение содержат 6 слоев: вегетационный индекс нормированной разности NDVI, улучшенный вегетационный индекс EVI, красный (620-670 нм), ближний инфракрасный (841-876 нм), синий (459-479 нм) и средний инфракрасный (1628-1652 нм) каналы датчика. Второй вид продукта - также 16-дневный композит 28 июля - 12 августа 2002 г., изображение имеет слоя: NDVI, красный, ближний ИК и средний ИК каналы. Наземное разрешение снимков 500 м [1].

Для классификации данных и анализа пространственной приуроченности поврежденных насаждений применялась карта, составленная по материалам наземных обследований и данным дешифрирования аэрофотоснимков. Использовалась цифровая модель рельефа в формате SRTM, полученная по данным микроволновой съемки с космического корабля Shuttle (2000 г). Использованный материал представлен изображениями, охватывающими территорию размером по $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ и имеет исходное пространственное разрешение 90 м, точность определения высоты составляет около 20 м [1].

На исследуемой территории высота местности над уровнем моря составляет от 76 до 650 м. Поврежденные леса расположены на высотах от 80 до 450 м, причем основная их часть - на высотах от 100 до 400 м. Остальная территория не рассматривается в связи с небольшой относительной площадью. Высоты определяются с интервалом 10 м [1].

Выделение поврежденных насаждений и картирование по снимкам состояло из нескольких шагов. В результате получены три картосхемы части поврежденной шелкопрядом территории в течение лета 1995 года по данным AVHRR. На основе снимков MODIS получена картосхема всей территории погибших насаждений (рисунок 4) [1].

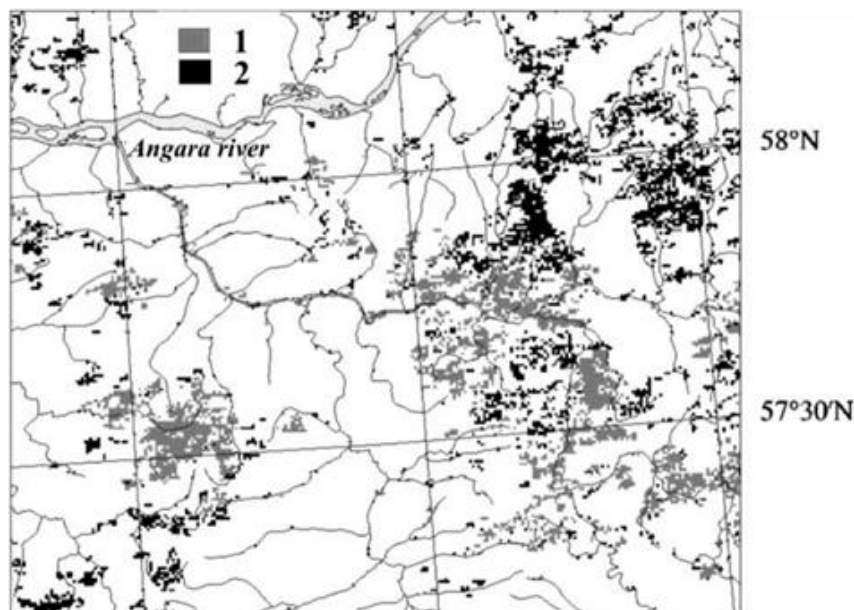


Рисунок 4 - Картограмма погибших в результате вспышки сибирского шелкопряда насаждений, составленная по данным MODIS:
 1 - погибшие древостой, 2 - темнохвойные насаждения

Совместный анализ результатов классификации изображений и модели рельефа позволил получить характеристики распределения поврежденных и погибших насаждений по элементам рельефа. Поскольку разные категории элементов рельефа (т.е. территории с определенными экспозициями, крутизной и высотой) на территории представлены неравномерно, то применялась процедура нормирования данных по площади. При этом площади поврежденных лесов для данной категории параметров рельефа (интервалы высоты, крутизны или экспозиции) были поделены на площадь с такими параметрами в пределах поврежденной территории темнохвойных насаждений до начала вспышки (исходная «кормовая база»). Площадь темнохвойных лесов до вспышки сибирского шелкопряда определялась как сумма погибших за время вспышки насаждений и темнохвойных насаждений, оставшихся после вспышки и выделенных в результате классификации снимка MODIS [1].

Через 5-6 лет после вспышки сибирского шелкопряда распределение поврежденных насаждений отличается от того, что наблюдалось в разгар вспышки в 1995 году. Часть поврежденных насаждений восстановилась, территории сплошных повреждений обозначились более отчетливо. Представленные на рис. 3 данные показывают, что на благоприятных для развития гусениц шелкопряда высотах погибла половина пихтовых лесов. Уцелевшие темнохвойные насаждения расположены на более высоких участках [1].

2.3 Съемка Spot-Vegetation в анализе динамики повреждения горно-таежных лесов сибирским шелкопрядом

В работе [7] на основе материалов съемки SPOT-Vegetation проведен анализ пространственно-временной динамики вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, произошедшей в 1998-2003 годах в горно-таежных лесах Восточного Саяна на сопредельных территориях Красноярского края и Иркутской области. Сенсор работает в четырех спектральных диапазонах (430-470 нм, 610-680 нм, 780-790 нм, 1580-1750 нм), имеет пространственное разрешение -1 x 1 км и полосу обзора 2250 км. Установлена взаимосвязь динамики поврежденных древостоев с элементами рельефа (высотой над у.м., азимутом, крутизной склона). Начальная фаза вспышки реализуется на плакорах ($h \sim 420-500$ м.), склонах южной и юго-восточной экспозиции [7].

Объект исследования расположен в Восточносаянской горной лесорастительной провинции кедровых лесов (Агул-Туманшетский округ таежно-черневых пихтовых и горно-таежных кедровых лесов. Восточный Саян в границах провинции представляет собой систему хребтов почти широтного простираения. Западная часть провинции образована невысокими плосковершинными хребтами (до 1500-2000 м), постепенно снижающимися к западу. К юго-востоку высота хребтов увеличивается [7].

В исследовании использованы следующие материалы: подекадные композиты снимков SPOT-Vegetation, топокарты (М 1 : 200000) и цифровая модель рельефа местности (ЦМР) разрешением 90 м, точность по вертикали ± 10 м, формат данных SRTM. Использовались также материалы лесоустройства (1996 г.) и схема лесопатологического состояния (обследование 2004 г.).

Космоснимки обрабатывались в программном пакете ERDAS Imagine. Статистический анализ данных проводился в программах Microsoft Excel и StatSoft Statistica. Основные этапы обработки снимков включали предобработку, анализ динамики NDVI, анализ динамики площадей поврежденных древостоев, анализ взаимосвязи повреждений и элементов рельефа [7].

Обработка временного ряда картосхем включала ряд этапов. На первом этапе проведено устранение “шумов”: ко всем классификационным картосхемам был применен медианный фильтр (со скользящим окном 3 x 3 пиксела). Второй этап - применение маски темнохвойных древостоев. Третий этап включал согласование площади выделенных поврежденных древостоев для всего временного ряда картосхем (путем переноса пикселей, принадлежащих классу поврежденных древостоев из классификаций с текущей датой на классификационные картосхемы со следующей датой). Точность маски темнохвойных (неповрежденных) древостоев и картосхемы поврежденных древостоев оценивалась методом капша (к)-статистики; ошибки пропуска и включения определялись сравнением с данными лесоустройства.

Вывод по проделанной работе следующие.

В мониторинге шелкопряда особо значимо выявление начальных стадий повреждения, что позволяет минимизировать ущерб лесам. В этой связи важно знать, на каких именно элементах рельефа возникают первоначальные повреждения древостоев. Использование в анализе 3D модели рельефа высокого разрешения позволило установить, что начальная фаза вспышки

реализуется на элементах рельефа с высотой 420-500 м малой крутизны (крутизна склонов $<4^\circ$ с максимум распределения, соответствующем -0. Это так называемые “плакоры”. В дальнейшем максимальный прирост площади повреждений соответствует склонам южной и юго-западной экспозиций, происходит освоение более крутых склонов и расширение осваиваемого шелкопрядом высотного диапазона до -400-540 м. При этом наблюдается эффект “расщепления” (бимодальность) распределения по высоте. Это можно объяснить истощением кормовой базы шелкопряда в зоне его оптимума и освоением насекомым прилегающих территорий, расположенных выше и ниже “плакорных” элементов рельефа [7].

2.4 Формирование лесов на шелкопрядниках. Картирование возрастных стадий лесной растительности.

В работе [В. В. Кузьмичев, В. П. Черкашин, М. А. Корец, И. А. Михайлова. Формирование лесов на шелкопрядниках и вырубках в верховьях р. Большая Кеть (Красноярский край)/Лесоведение, 2001- № 4, с. 8-14] по материалам лесоинвентаризации за период в 35 лет после вспышки массового размножения сибирского шелкопряда прослежен характер восстановления и формирования молодых древостоев на шелкопрядниках и вырубках в условиях равнинной тайги Западной Сибири. Сделан вывод о том, что в течение 15-20 лет на поврежденных сибирским шелкопрядом участках древесина не продуцируется. Формируются низкополнотные древостой березы и осины, которые во многом уступают смешанным древостоям, возникающим после рубок с сохранением подроста. Авторы статьи и другие исследователи разделяют два типа восстановления темнохвойного леса: на пройденных пожарами территориях и не затронутых огнем. По территории, на которой вспышка сибирского шелкопряда была в 1914 году, отмечено, что темнохвойные леса уцелели на 30% площади, остальная часть представлена молодняками лиственных пород и старыми гарями.

Картографированию возрастных стадий лесной растительности по данным дистанционного зондирования с учетом данных наземной инвентаризации посвящена работа [Данилова И.В., Корец М.А., Рыжкова В.А. Картографированию возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разновременных спутниковых изображений Landsat/ Исследование Земли из космоса, 2-17, №4, с. 12-24]. На примере лесных массивов южной части Приенисейской Сибири показано, что при использовании снимков, полученных в разные сезоны, можно выделить коренные и производные насаждения разного возраста, из которых формируются восстановительные ряды темнохвойных и светлохвойных лесов в разных типах лесорастительных условий. Такие методы при использовании в анализе восстановительных сукцессий позволяют оценить возрастную структуру лесного покрова на шелкопрядниках.

Проведенные исследования показывают, что регулярные съемки территории сибирских лесов из космоса позволяют вести мониторинг состояния древостоев в очагах вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Первые признаки повреждений древостоев заметны в конце вегетационного периода года с катастрофическим увеличением численности вредителя.

2.5 Исследуемая территория

В данной работе анализируются последствия вспышки сибирского шелкопряда, имевшая место быть 1952-1957 годах на территории Кеть – Чулымского междуречья в долинах рек Кеть и Чулым (рисунок 5). Территория вспышки ограничена 56° и 60° с.ш., 86° и 95° в.д.

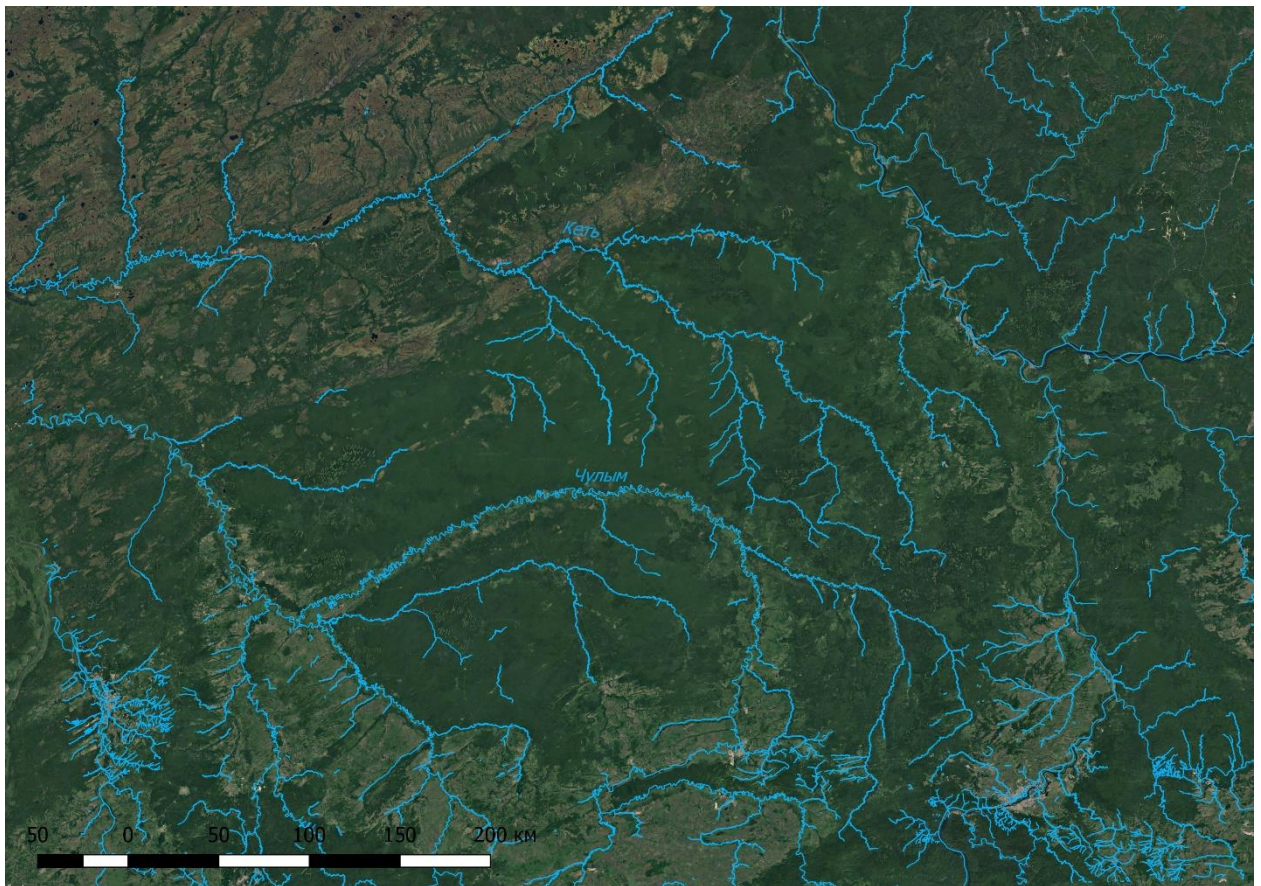


Рисунок – 5 Исследуемая территория

Территория Средней Сибири в основном совпадает с Сибирской платформой. На территории Средней Сибири преобладает денудационный рельеф, отличающийся геологической ярусностью в связи с новейшими поднятиями и чередованием горных пород различной степени устойчивости. Поверхность территории страны разрезана густой сетью речных долин, отличающихся каньонообразностью и асимметричностью.

Климат Средней Сибири резко континентальный, что вызвано её расположением в средней части Северной Азии. Резкая континентальность создаёт свой особый режим выветривания, почвообразования, гидрологический режим рек, рельефообразующих процессов, своеобразное развитие растительности и т. д. Сильное переохлаждение земной поверхности зимой вызывает большие различия между летними и зимними температурами, а также сезонными количествами осадков. Разница между среднемесячными

температурами зимы и лета составляет 50° — 65 °С, а абсолютная годовая амплитуда температур может превысить 100 °С. Специфическими чертами среднесибирской тайги, резко отличающими ее от тайги Западной Сибири, являются резко континентальный климат и почти повсеместное распространение мерзлоты, незначительная заболоченность, господство монотонной лиственничной тайги и мерзлотно-таежных почв. Подчеркивая специфику таежной зоны Средней Сибири, ее зовут таежно-мерзлотной зоной. От северной границы таежной зоны до южной вдоль Енисея меридионально вытянута полоса, где выпадает больше осадков, чем на остальной территории, выше мощность снежного покрова, меньше годовые амплитуды температур. Это создает условия для увеличения влажности почв и мощности деятельного слоя, островного распространения мерзлоты. Наряду с мерзлотно-таежными здесь распространены подзолистые и дерново-подзолистые почвы. К этой полосе, имеющей ширину от 300 до 450 км, приурочены темнохвойные и темнохвойно-светлохвойные леса. Здесь произрастают ель и кедр, пихта и береза, сосна и лиственница сибирская [15].

Темнохвойные леса в районе исследования интенсивно эксплуатируются, поэтому большие площади представлены вырубками разного возраста, где через стадию мелколиственных насаждений восстанавливаются коренные пихтовые и еловые древостои. За последние годы существенно уменьшилась доля хвойных пород и соответственно увеличилась доля лиственных. Уменьшение площади хвойных обусловлено комплексом причин, основными из которых являются рубки главного пользования, повреждения насаждений лесными пожарами и вредителями леса, длительные процессы естественного лесовозобновления на вырубках, горях [15].

3 Исходные данные

В работе для определения территории поврежденных и погибших в результате вспышки массового размножения сибирского шелкопряда лесов в 1952-1957 годах использовались снимки 1976-1977 годов, и предполагалось, что лиственные леса и не облесившиеся за 20 лет после вспышки территории являются территориями погибших темнохвойных лесов. Затем в течение следующих 40 лет на данной территории могли появиться темнохвойные или смешанные с присутствием темнохвойных пород леса. Поэтому выбор наборов данных дистанционного зондирования был в 1970-х и 2017 годах.

3.1 Характеристики приборов дистанционного зондирования Земли, используемых в работе

Для анализа восстановления лесного покрова использовались снимки среднего пространственного разрешения, получаемые по программе Landsat с 1972 года. Выбор этого источника данных дистанционного зондирования обусловлен тем, что это самый продолжительный по времени проект, поставляющий в свободном доступе для пользователей согласованные по радиометрическим и картографическим характеристикам снимки в оптическом диапазоне.

На данную территорию снимки Landsat спектрорадиометра MSS (Multy Spectral Scanner) получены в 1976-1977 годах.

Характеристика прибора Landsat 2 MSS:

- спектральный диапазон 0.5 – 1.1 мкм;
- количество спектральных каналов 4;
- временное разрешение 18 дней;
- размер изображения 185 км x 185 км;
- полоса обзора 185 km.

Таблица 1 – Спектральные параметры прибора Landsat 2 MSS

Номер спектрального канала	Спектральный диапазон(мкм)	Пространственное разрешение(м)
4	0,5 – 0,6	68 м x 83 м
5	0,6 – 0,7	68 м x 83 м
6	0,7 - 0,8	68 м x 83 м
7	0,8 – 1,1	68 м x 83 м

Для анализа современного состояния использовались снимки спектрорадиометра Landsat 8 OLI (Operational Land Imager). Характеристики данных следующие:

- уровень обработки 1Т (коррекция рельефа);
- формат изображений GeoTIFF;
- размер пикселя 15 метров / 30 метров / (панхроматический / мультиспектральный);
- проекция UTM - универсальная поперечная Меркатора, зона 46;
- система географических координат WGS 84.

В таблице 2 приведены характеристики спектрорадиометра.

Таблица 2 – Характеристика прибора Landsat 8 OLI

Номер спектрального канала	Спектральный диапазон(мкм)	Пространственное разрешение (м)
Канал 1 — побережья и аэрозоли	0,433—0,453	30
Канал 2 — синий	0,450—0,515	30
Канал 3 — зелёный	0,525—0,600	30
Канал 4 — красный	0,630—0,680	30
Канал 5 — ближний ИК	0,845—0,885	30
Канал 6 — ближний ИК	1,560—1,660	30
Канал 7 — ближний ИК	2,100—2,300	30
Канал 8 — панхроматический	0,500—0,680	15
Канал 9 — перистые облака	1,360—1,390	30

3.2. Карта растительного покрова Российской Федерации

Карта растительного покрова Российской Федерации создана по данным спутниковой системы Terra-MODIS с использованием разработанных в ИКИ РАН технологий автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования. Метод картографирования основан на классификации очищенных от влияния облаков и других мешающих факторов композитных изображений, соответствующих разносезонным временным интервалам и учитывающих особенности фенологической динамики растительности. Композитные спутниковые изображения сформированы с использованием технологии предварительной обработки данных на основе результатов ежедневных измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах. Распознавание типов растительного покрова выполнено на основе алгоритма локально-адаптивной обучаемой классификации, позволяющей учесть географическую изменчивость спектральных характеристик классов. Созданная цифровая карта имеет пространственное разрешение около 250 м и получена по спутниковым данным 2010 года, в то время как разработанная технология динамического картографирования растительности по спутниковым данным открывает принципиально новую возможность ее ежегодного обновления [14].



Рисунок 6 – Карта растительного покрова Российской Федерации

Данная карта содержит необходимые для данной работы классы лесного покрова – лиственные, вечнозеленые и смешанные леса.

4 Методы анализа данных

4.1 Алгоритмы кластеризации данных дистанционного зондирования Земли

Кластеризация снимков Landsat 8 OLI и Landsat 2 MSS проводилась для создания карты растительного покрова, главным образом лесного.

Автоматическая классификация – кластеризация - не требует дополнительной наземной информации. Методологической основой автоматической классификации является кластерный анализ, в ходе которого пытаются определить все встречаемые типы объектов при некотором уровне обобщения (выбранных критериях объединения, разделения или числа классов), а задача их интерпретации решается на втором этапе. Методы делятся на однопроходные, когда за один просмотр изображения все пиксели распределяются между кластерами, и итерационные многопроходные, когда результат получается за несколько итераций.

Типичным представителем итерационной процедуры кластеризации является метод кластеризации K – means. Метод основан на использовании спектрального расстояния между пикселями изображения и последовательно через итеративную процедуру приводит к результату, когда спектральные расстояния между точками одного кластера являются минимальными. Пространственное расположение пикселей не рассматривается, как это делается при сегментации изображений.

Входными параметрами являются: N – заданное количество кластеров; T – предел сходимости; M – максимальное количество итераций.

На первом шаге выбираются центры (то есть пиксели) каждого из N кластеров, значения яркости которых в каждом канале определяют средние значения яркости кластера. Это выполняется следующей процедурой. Для каждого из n спектральных каналов определяются среднее значение яркости пикселей μ_i , $i=1, \dots, n$, и стандартное отклонение σ_i по всему изображению.

Затем интервал $(\mu_i - \sigma_i, \mu_i + \sigma_i)$ разбивается на $n-1$ равных интервалов, значения границ между которыми, считая начало и конец всего интервала, и являются центрами кластеров.

На втором этапе все пиксели изображения распределяются по кластерам на основе минимума спектрального расстояния, определяемого как евклидово расстояние в пространстве спектральных признаков. Каждая точка изображения относится к тому кластеру, до центра которого ее спектральное расстояние минимально из всех остальных.

На третьем этапе происходит пересчет средних значений каждого кластера по вновь распределенным точкам.

На четвертом этапе, если это не первая итерация, подсчитывается количество пикселей, перешедших в другие классы, и если это значение не превышает заданное значение сходимости T , то кластеризация заканчивается. Также кластеризация прекращается, если количество итераций достигло M . В противном случае происходит процедура, описанная в шаге два.

Таким образом, исходное изображение разбивается на кластеры, в результате получается тематическое изображение, каждый пиксель которого принимает одно из N значений, что определяет его кластер. Связанность областей с одинаковыми значениями пикселей не определяется, то есть в общем случае определяются несвязные области с одинаковыми значениями пикселей. Следующим этапом является интерпретация кластеров как типов подстилающей поверхности. При недостаточности спектральных признаков для выделения типов подстилающей поверхности используют дополнительные наборы признаков:

- текстурные характеристики, главные компоненты как линейно независимые;
- комбинации исходных спектральных каналов, характеристики в виде индексов.

4.2 Кластеризация снимков 1976-1977 года с прибора Landsat 2 MSS

Кластеризация снимков Landsat 2 MSS выполнялась методом K – means. Кластеризация проводилась на 100 кластеров, чтобы было возможным разделить лесные насаждения с преобладанием лиственных, преобладанием хвойных и смешанные насаждения, поскольку это является важным для выявления хода восстановительной сукцессии. Интерпретация кластеров проходила по картам лесов СССР из Атласа лесов СССР 1977 года визуально, использовались также спектральные профили пикселей многоспектрального изображения.

4.3 Кластеризация снимков 2017 года с прибора Landsat 8 OLI

Кластеризация снимков Landsat 8 OLI проводилась также на 100 кластеров. и интерпретация кластеров осуществлялась по карте растительного покрова России.

Разница спектров отражения лиственных и темнохвойных насаждений определяется для разных комбинаций спектральных каналов при визуальном оценивании. В комбинации каналов 4-5-3 насаждения с преобладанием лиственных пород смотрятся как оранжевые, с преобладанием темнохвойных - темными с оттенками темно-зеленого (рисунок 7). Для снимков Landsat 8 OLI составлены «спектральные портреты» разного породного состава: темнохвойные и лиственные.

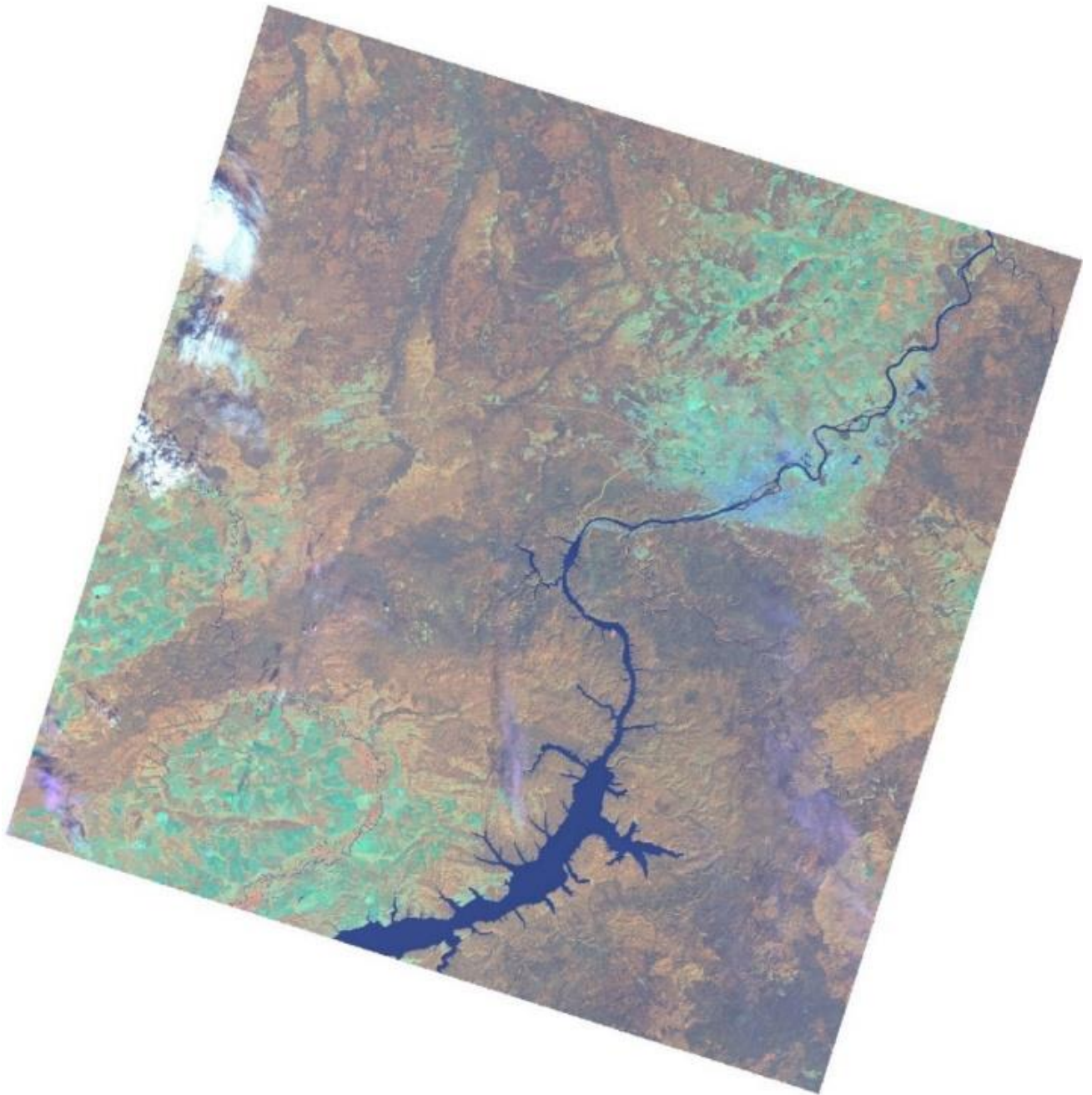


Рисунок 7 – Сцена 143020 Landsat 8 OLI в комбинации спектральных каналов 4-5-3 в масштабе 1:200000

Территория исследования составляет около 5 млн га, и эта территория покрывается семью-восемью сценами Landsat. Так как сцены в 1976-1977 и 2017 годах доступны в разные годы, различные периоды летнего сезона и с разным процентным покрытием облаками, то мозаика снимков получилась неудовлетворительного качества. Кластеризация и согласование ее результатов проводились для каждого снимка индивидуально.

5 Анализ данных дистанционного зондирования

5.1 Программное обеспечение, используемое в работе

5.1.1 Программный пакет ENVI

ENVI (Environment for Visualizing Images — среда для отображения снимков) — программный продукт для визуализации и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), который включает в себя набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и её интеграции с данными ГИС [22]. Программные решения используются в различных областях, включая дистанционное зондирование, инженерное искусство, науки о земле, изучение воздушного пространства и космоса, медицину, разработку нефти и газа и биотехнологии. Благодаря комплексному подходу к обучению, проведению консультаций и технической поддержке, продукты ИТТ Visual Information Solutions представляют собой комплексные решения визуализации и анализа данных. ИТТ VIS (на рынке с 1977г.) предлагает интегрированные программные решения, которые помогут ученым, инженерам, исследователям и работникам медицины превратить массивы данных в полезную информацию. 150 000 клиентов из более чем 80-ти стран мира используют IDL, ENVI и IAS для анализа данных и изображений, а также развёртывания приложений для работы с графической информацией [22]. ENVI содержит наиболее полный пакет необходимых инструментов и функций для визуализации, анализа и презентации цифровых изображений [14]. ENVI включает в себя функции:

- по обработке и глубокому анализу мультиспектральных снимков;
- по исправлению геометрических и радиометрических искажений;
- поддержки объемных растровых и векторных форматов;

- по интерактивному улучшению изображений;
- по интерактивному дешифрированию и классификации;
- по анализу снимков в радиодиапазоне;
- построения запросов;
- оцифровки и многие другие.

Один из наиболее эффективных и доступных программных продуктов, обеспечивающих полный цикл обработки опτικο-электронных и радарных данных дистанционного зондирования Земли. Основные преимущества ПК ENVI:

- интуитивно понятный графический интерфейс пользователя;
- ПК ENVI лицензирован ведущими операторами космических данных;
- интеграция с программными продуктами ArcGIS;
- наличие языка программирования IDL.

В отличие от других пакетов по обработке снимков, в ENVI встроен удобный язык программирования IDL (Interactive Data Language), так что возможно расширить функциональные возможности ENVI или создать собственные подпрограммы [22]. Открытая архитектура ENVI обеспечивает удобство обработки данных, полученных со спутников Landsat, SPOT, RADARSAT, NASA, NIMA, NOAA, EROS Data Center, Space Imaging, Terra, ESA, а также предусматривается включение в этот список Earth Watch и ORBIMAGE и других спутников.

В данной работе использовались модули кластеризации моногоспектральных снимков и постклассификационной обработки.

5.1.2 Программный пакет ArcGIS

Программный пакет ArcGIS включает полный набор приложений, которые поддерживают решение геоинформационных задач, в том числе, картографирование, сбор данных, их анализ, управление геоданными

изображениями, а также совместный доступ к пространственной информации [10].

ArcGIS — это платформа, которая используется для управления рабочими процессами и проектами ГИС, для построения карт, моделей и приложений. Кроме того, она является отправной точкой и базовым фундаментом для развертывания ГИС в организациях и в веб-среде. Она используется для публикации и обмена географической информацией с другими пользователями. Пользователи версии Desktop могут:

- обмениваться информацией с другими профессиональными пользователями настольной версии путем обеспечения доступа к пакетам карт и другим ГИС-пакетам;

- обмениваться с другими пользователями информацией при помощи мобильных, интернет и пользовательских систем путем публикации карт и соответствующей географических информационных сервисов с использованием ArcGIS for Server и ArcGIS Online [6].

В данной работе применялись возможности программного комплекса для проведения пространственного анализа, оценки площадей объектов, построения карт.

5.2 Предварительная обработка данных дистанционного зондирования

В программе ENVI 4.5 из отдельных слоев было создано мультиспектральное изображение. Для этого в программе ENVI открывали слои 1-5 и 7 «File -> OpenExternalFile -> Landsat -> GeoTIFF». Дальше мультиспектральное изображение создавалось с помощью функции «LayerStacking». На рисунке 7 показано это изображение с визуализацией каналов 5-4-3 в композиции RGB:



Рисунок 7 - Мультиспектральное изображение 2017 с прибора Landsat 8 OLI
в комбинации каналов 3,2,1

Для изображений 1977 с прибора Landsat 2 MSS мультиспектральное изображение собиралось из 4, 5, 6 и 7 спектральных каналов.

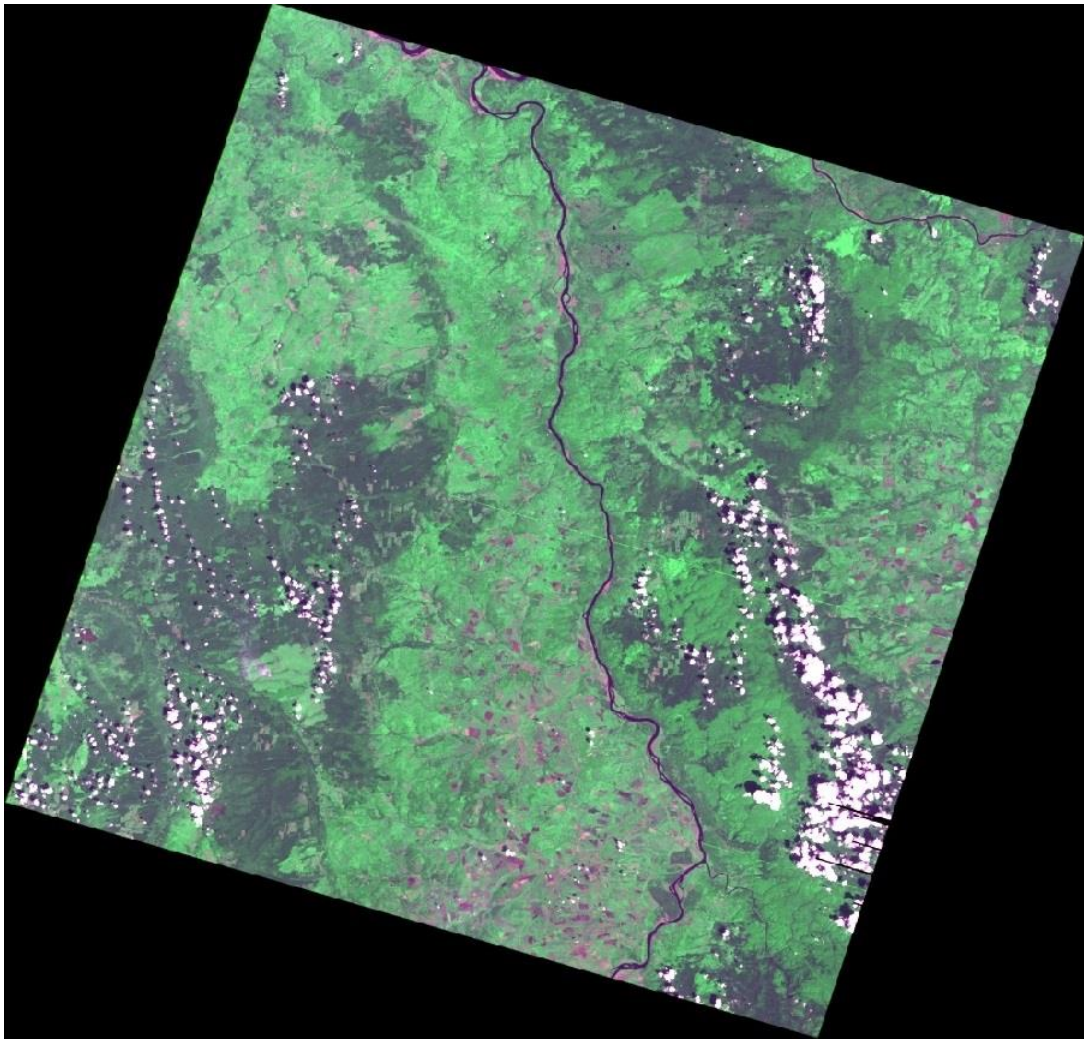


Рисунок – 8 Мультиспектральное изображение 1977 года с прибора Landsat 2 MSS в комбинации каналов 5,6,4

Практически на каждом снимке присутствует облачность, которая исключалась маскированием после кластеризации снимков.

5.3 Кластеризация космических снимков

5.3.1 Кластеризация снимков 2017 года, полученных с прибора Landsat 8 OLI

Следующим шагом выполнена кластеризация снимков Landsat 8 OLI 2017 года на 100 кластеров.

Интерпретация кластеров выполнена на основе карты типов растительности Российской Федерации [14]. Выделены лиственные и вечнозелёные леса, отдельно выделены сосновые леса, а также повреждения, болота, вырубки.

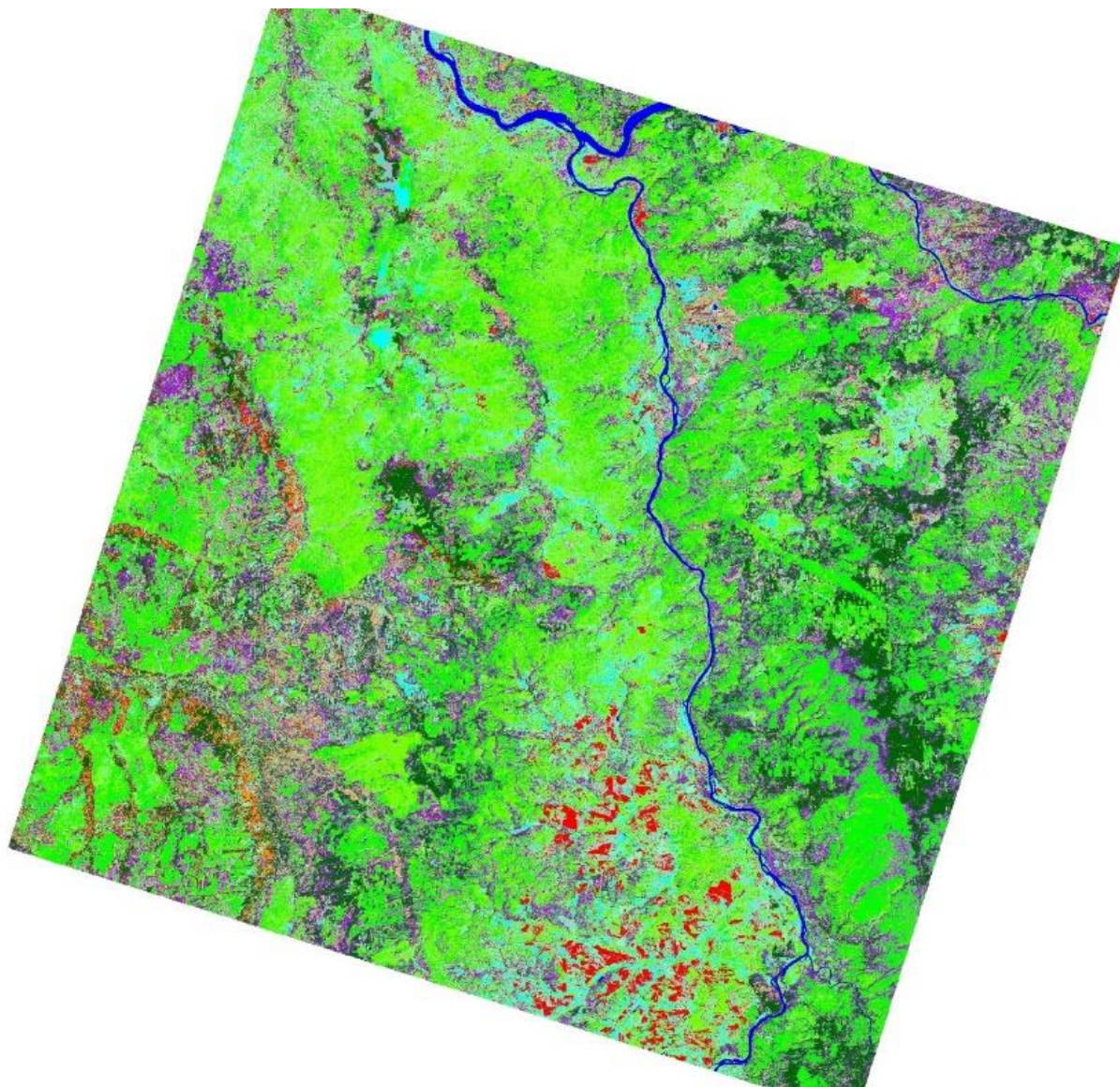


Рисунок 9 – Результат кластеризации изображения 2017 с прибора Landsat 8 OLI сцены 143020 в масштабе 1:150000

В результате кластеризации выделены лиственные (светло – зеленый цвет), вечнозеленые (темно - зеленый, фиолетовый цвет) и поля (красный,

голубой цвет). Сосновые леса на данном снимке фрагментарны, представлены желтым цветом.

5.3.2 Кластеризация снимков 1977 года, полученных с прибора Landsat 2 MSS

В результате кластеризации снимков 1977 года, полученных с прибора Landsat 2 MSS, на 5 сценах исследуемой территории выделены темнохвойные и лиственные леса.

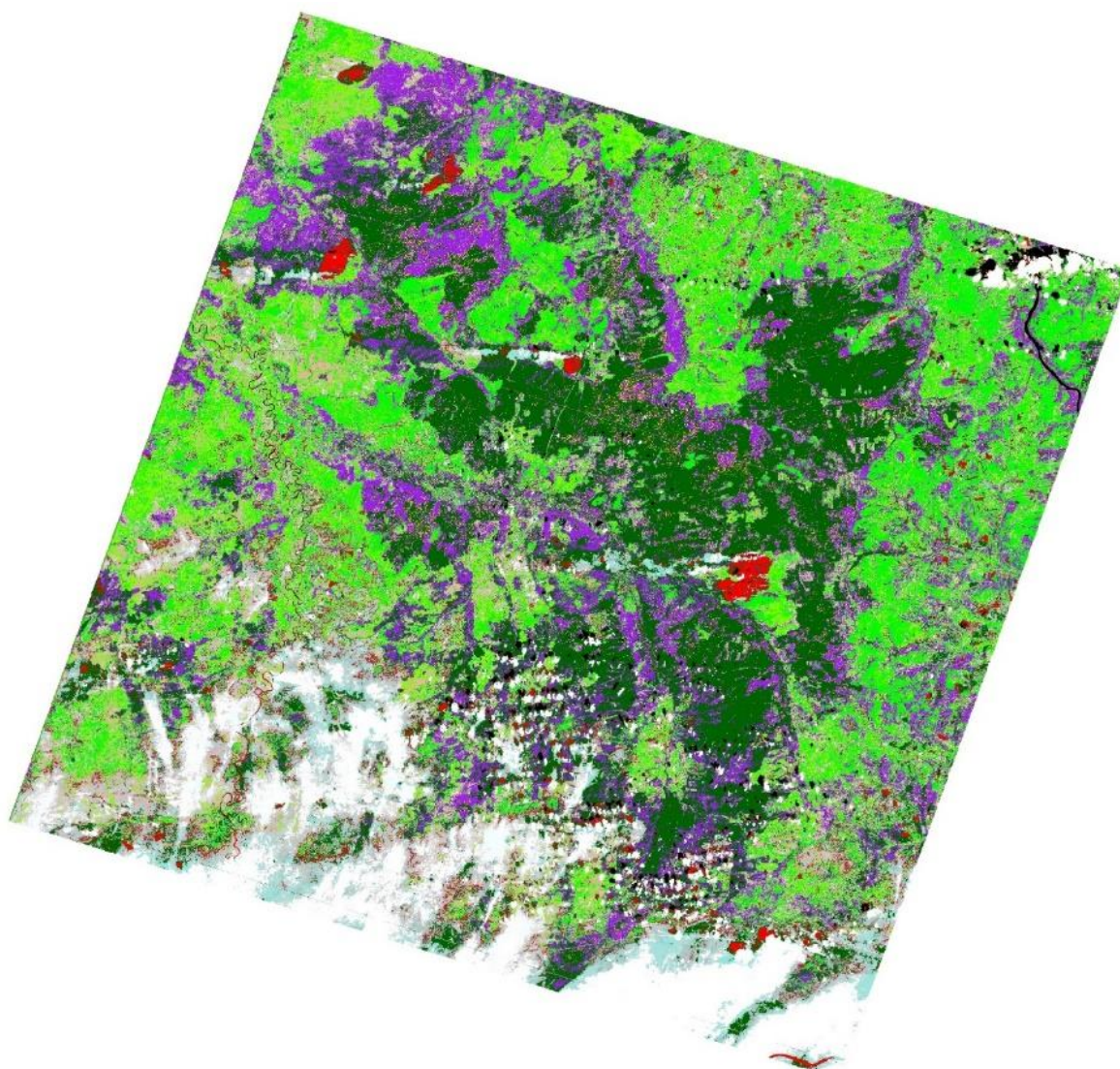


Рисунок 8 - Результат кластеризации снимка 1977 с прибора Landsat 2 MSS сцены 156020 в масштабе 1:150000

На рисунке 8 представлен результат кластеризации снимка 1977 года с прибора Landsat 2 MSS сцены 156020 в масштабе 1:150000. Ярко-зеленым выделен лесной тип растительности, темно-зеленым и фиолетовым – темнохвойные леса, красным обозначены гари.

Полученные в результате кластеризации нескольких сцен Landsat MSS растры были объединены, и по ним была создана в результате постклассификационной обработки карта лиственных лесов, находящихся на территории исследования в 1970-х годах. В дальнейшем этот результат использовался для выделения на результатах классификации снимков Landsat 8 OLI участков поврежденных и погибших в результате вспышки сибирского шелкопряда в 1950-х годах пихтовых лесов.

6 Результат работы

6.1 Состояние лесного покрова на исследуемой территории в 1976-1977 году.

На рисунке 9 представлено состояние лесного покрова на месте вспышки сибирского шелкопряда в 1976-1977 году.



Рисунок 9 – Состояние лесного покрова на исследуемой территории в 1976-1977 году

Анализ показал, что на территории в 1976-1977 годах преобладающую часть лесного покрова занимают лиственные леса, порядка 3000000 га, гари – приблизительно 20000 га, а темнохвойные леса в свою очередь занимают около 3700000 га и территориально окружают лиственный лес. Эти темнохвойные леса не пострадали в результате вспышки в 1952-1957 годов.

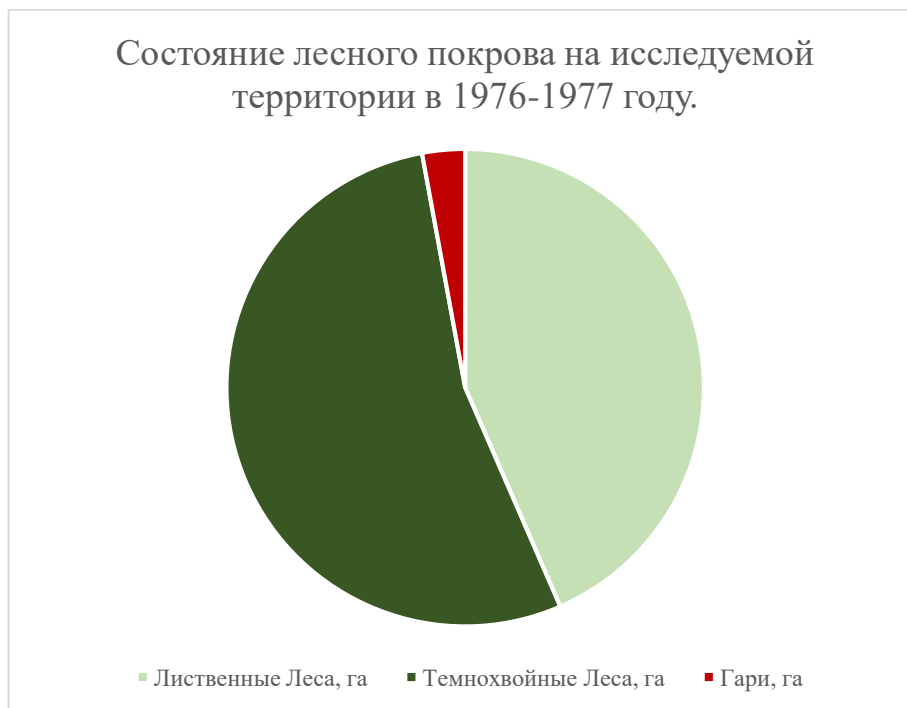


Рисунок 11 – Диаграмма состояния лесов на исследуемой территории в 1976-1977 году.

Основываясь на данных из литературных источников, которые указывают на то, что по прошествии порядка 30 лет территория, пораженная сибирским шелкопрядом, сменяется лиственными лесами, было установлено, что территория лиственного леса, окруженная темнохвойным, является местом вспышки 1952-1957 годов.

6.2 Состояние лесного покрова на исследуемой территории в 2017 году

На рисунке 12 представлена актуальная сложившаяся ситуация на территории вспышки сибирского шелкопряда в Кеть – Чулымском междуречье.

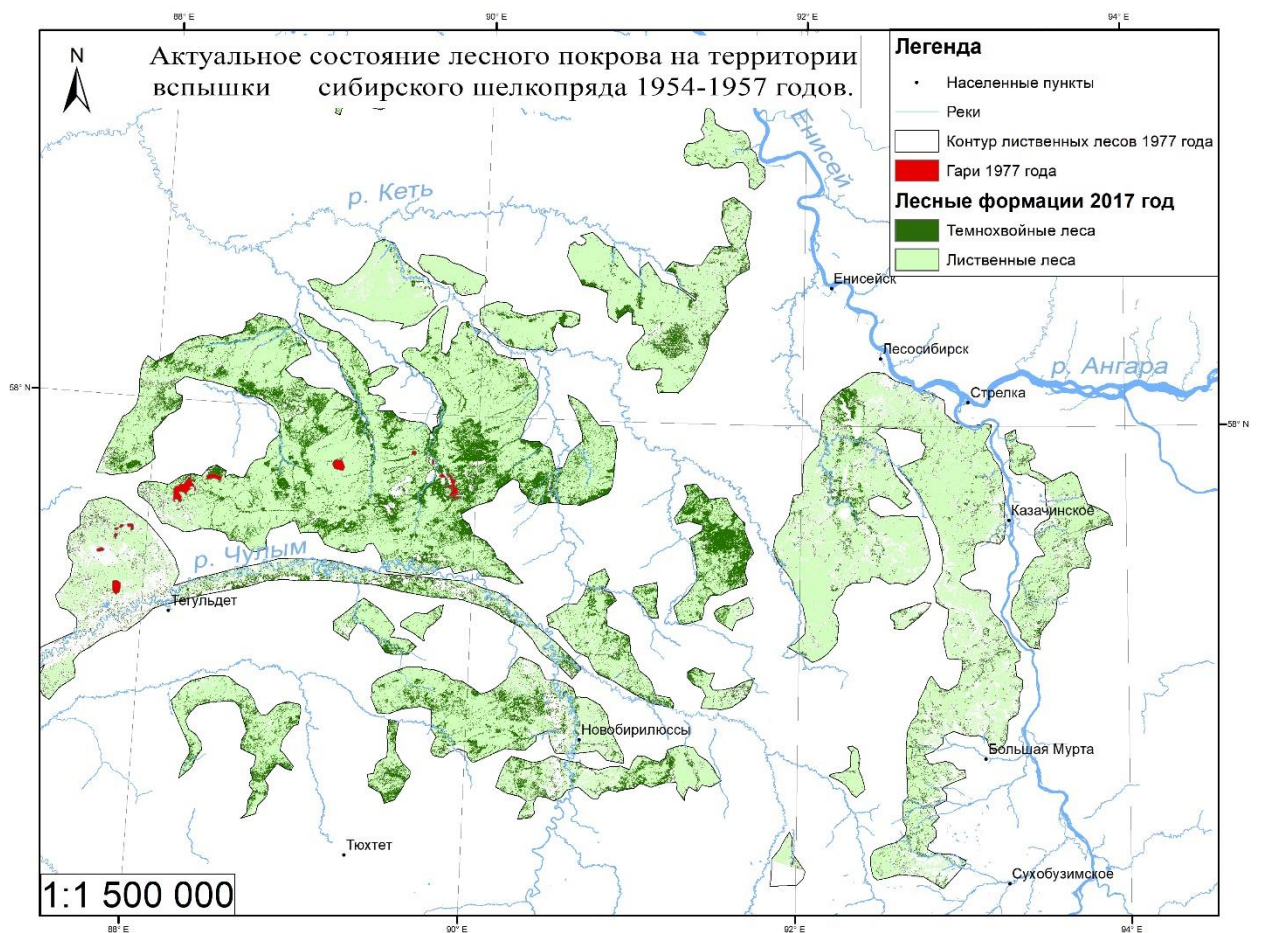


Рисунок 12 – Актуальное состояние лесного покрова на территории вспышки сибирского шелкопряда 1954-1957 годов.

Анализ территории показал, что за время восстановительных сукцессий на территории вспышки было восстановлено 560000 га темнохвойных лесов, лиственные леса в свою очередь занимают порядка 2500000 га.

На рисунке 13 представлена диаграмма, отражающая актуальное состояние лесного покрова на территории вспышки сибирского шелкопряда 1954-1957 годов.



Рисунок 13 – Диаграмма актуального состояния лесного покрова на территории вспышки вспышки сибирского шелкопряда 1954-1957 г.

На территории гарей 1977 года, площадь которых составляет порядка 12000 га, восстановились в основном смешанные леса на площади 6900 га, было отмечено ярко – выраженное восстановление лиственных лесов, занявших территорию 6900 га, темнохвойная растительность заняла всего 1500 га.



Рисунок 14 – Диаграмма состояния лесного покрова исследуемой территории на месте гарей в 2017 году

Полученный в работе результат согласуется с представлением о временных рамках восстановительных сукцессий в шелкопрядниках (рисунки 1 и 2), что в течение 50-70 лет в отсутствие пожаров или на территории гарей преимущественно произрастает лиственный лес, который в дальнейшем при благоприятных условиях сменится темнохвойным лесом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проанализирована литература по использованию данных дистанционного зондирования для анализа лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом, и процессов восстановления лесного покрова.

Были подготовлены данные дистанционного зондирования Земли и информации о составе лесов на исследуемой территории.

Проведен анализ данных дистанционного зондирования и дана оценка восстановительного процесса лесного покрова. Оценка восстановительного процесса лесного покрова отражена в круговых диаграммах.

В результате работы подготовлены карты состояния лесного покрова на исследуемой территории в 1976-1977 году и карта актуального состояния лесного покрова в 2017 году.

За время восстановительных сукцессий на территории вспышки было восстановлено 560000 га темнохвойных лесов, лиственные леса в свою очередь занимают порядка 2500000 га. На территории гарей 1977 года, площадь которых составляет порядка 12000 га, восстановились в основном смешанные леса на площади 6900 га, было отмечено ярко – выраженное восстановление лиственных лесов, занявших территорию 6900 га, темнохвойная растительность заняла всего 1500 га. Полученный в работе результат согласуется с представлением о временных рамках восстановительных сукцессий в шелкопрядниках, что в течение 50-70 лет в отсутствие пожаров или на территории гарей преимущественно произрастает лиственный лес, который в дальнейшем при благоприятных условиях сменится темнохвойным лесом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Федотова, Е.В. Анализ пространственной приуроченности очагов повреждения таежных лесов сибирским шелкопрядом по данным мелкомасштабного дистанционного зондирования / Е.В. Федотова, С.Т. Им, Харук В.И. 2007 г.
- 2 Гродницкий, Д. Л. Сибирский шелкопряд и судьба пихтовой тайги [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://nrk.cross-ipk.ru/body/pie/body/7%5Csibmoth%5Cpubl.htm>
- 3 Григоровская, П.И Шелкопряд (коконопряд) сибирский [Электронный ресурс]: Пестициды. – Режим доступа: http://www.pesticity.ru/pest/dendrolimus_sibiricus
- 4 Экологическая сукцессия [Электронный ресурс]: Grandars - Режим доступа: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sukcessiya.html>
- 5 Кондаков, Ю.П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края / Энтомологические исследования в Сибири – Вып. 2. – Красноярск: КФ РЭО. – 2002 – С. 25 – 74.
- 6 Буренина Т.А., Кузьмичев В.В., Харук В.И. Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири / Сибирский экологический журнал, 2005. - С. 153-162.
- 7 Им С.Т., Харук В.И., К. Дж. Рэнсон, Солдатов В.В. Съемка Spot-Vegetation в анализе динамики повреждения горно-таежных лесов сибирским шелкопрядом / Исследование Земли из космоса, 2007. - № 1. - С.74-80.
- 8 Валендик Э.Н., Верховец С.В., Кисляхов Е.К., Косов И.В., Тюльпанов Н.А. Подготовка шелкопрядников к лесовосстановлению//Лесное хозяйство. – 2004. – № 3. – С. 41-42.
- 9 Кондаков Ю.П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края

10 Никитина Ю.В. Разработка точечной модели популяции сибирского шелкопряда// ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2006 – 5 С.

11 Кузьмичев В. В., Черкашин В. П., Корец М. А., Михайлова И. А. Формирование лесов на шелкопрядниках и вырубках в верховьях р. Большая Кеть (Красноярский край)/Лесоведение. - 2001- № 4. - С. 8-14.

12 Коломиец Н.Г. Сибирский шелкопряд – вредитель равнинной сибирской тайги // Тр. по лесн. хоз-ву Сибири. Новосибирск, 1957. - Вып. 3. - С. 64—76

13 Фуряев В.В. Шелкопрядники тайги и их выжигание. - М.: Наука, 1966. - 92 с.

14 Карта растительности России [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317>

15 Средняя Сибирь [Электронный ресурс]: – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Средняя Сибирь](https://ru.wikipedia.org/wiki/Средняя_Сибирь)