



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (магистерская диссертация)

На тему «Использование мультиспектральной спутниковой съемки при оценке
состоянии растительного покрова»

Исполнитель

Будасв Хетаг Станиславович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«04» июня 2020 г.

Санкт-Петербург

2020_

Оглавление

Введение.....	4
1. Растительный покров.....	7
1.1 Классификация растительности	11
1.2 Воздействие хозяйственной деятельности человечества на растительность земли	12
1.3 Экологические функции растительного покрова	14
1.8 Описание спектральных каналов съемки.....	Error! Bookmark not defined.
1.9 Группировка спутников дистанционного зондирования земли	Error! Bookmark not defined.
2. Развитие спутникового картографирования растительного покрова в России	19
2.1 Обработка космических снимков.....	40
2.2 Атмосферная коррекция данных ДЗЗ в оптическом диапазоне	47
2.3 Получение коэффициента спектральной яркости.....	49
2.4 Вегетационные индексы растительности.....	53
2.5 Фильтрация эффектов маскирующего влияния облаков.....	Error! Bookmark not defined.
2.6 Метод радиометрического исправления искажений.....	54
2.7 Реконструкция временных рядов данных ДЗЗ....	Error! Bookmark not defined.
3. Контрастные изменения в росте растительности на фоне	62
различных климатических воздействий на протяжении последних трех	63
десятилетий в бассейне реки Селенги и Байкала	63
3.1 Материалы и методы	67
3.2 Климатические данные	69
3.3 Данные о земном покрове	70
3.4 Данные NDVI.....	70
3.5 Тейл-Сен Анализ медианных трендов	71

3.6 Тест Манна – Кендалла	71
3.7 Частичный корреляционный анализ.....	72
3.8 Результаты	73
3.8 Состояние и изменение растительности	77
3.9 Изменение растительности	79
4. Связь между NDVI и климатическими факторами	81
4.1 Обсуждение	84
4.2 Реакция лугов и лесов на температуру и количество осадков.....	85
4.3 Влияние человеческих нарушений на динамику растительности	87
Выводы.....	89
Список литературных источников.....	90

Введение

Использование мультиспектральной съемки в ходе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) — это новый шаг в развитии сельского хозяйства и экологическом мониторинге а также изучении растительного покрова, данная технология предоставляет фермерам почти мгновенную максимально детальную информацию о том, что происходит на полях покрытых растительностью.

Дистанционное зондирование на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открывает широкие возможности для быстрого и простого сбора полевых данных для точного сельского хозяйства. Эта область исследований быстро расширяется благодаря преимуществам в управлении сельскохозяйственными ресурсами, особенно для изучения здоровья сельскохозяйственных культур.

Современное сельское хозяйство в мире и в России все больше переориентируется на интенсивный тип развития, одним из наиболее перспективных, инструментов которого является точное земледелие. Точное земледелие – это система управления продуктивностью посевов, основанная на использовании комплекса спутникового мониторинга и компьютерных технологий. В основе всей системы точного земледелия лежит использование подробных карт полей со всеми их характеристиками (химический состав почвы, уровень ее влажности, количество получаемой солнечной радиации, рельеф поля и т.п.). Учет и обработка значительного количественного объема данных, а так же факторов влияния, позволяет получить подробную карту поля, оценить его состояние, причем, как всего поля в целом, так и отдельных его участков, и при необходимости оперативно скорректировать производственный процесс. Благодаря таким картам фермер получает

возможность более рационально распределять ресурсы между участками поля.

Подобным образом, удастся избежать неграмотного расхода ресурсов там, где они прежде использовались в избытке, и повысить продуктивность тех участков, которые ранее недополучали в удобрениях, вспашке или поливе. Также появляется возможность обнаружить участки, пораженные вредителями или болезнью, на начальном этапе. Одним из наиболее перспективных способов оценки состояния продуктивных полей является использование мультиспектральных и гиперспектральных снимков и расчет вегетационных индексов.

При съемке формируются одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения. Различные комбинации этих изображений позволяют выявить процессы и явления, которые сложно или невозможно определить на снимке в видимом спектре.

Как следствие, в последние годы появляется все больше исследований растительного покрова и его отдельных свойств на основе данных дистанционного зондирования. Космические снимки заняли важное место в изучении лесных сообществ, широко применяются для изучения водной и околотоводной растительности, растительного покрова болот, высокогорий и тундр, в геологии месторождений полезных ископаемых, а также при ведении сельского хозяйства. Оценка состояния растительного покрова при помощи данных (ДЗЗ), происходит в частности путем получения мультиспектральных и гиперспектральных изображений плодородного участка земли. Снимки представленных типов имеют широкий спектр фиксируемых значений частот отраженного света и дают дополнительные возможности для восприятия и анализа если сравнивать с обычным, видимым человеческим глазом изображением.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенной методики для создания репрезентативных карт растительности местного уровня широким кругом пользователей без дополнительной разработки сложных вычислительных массивов как на производственных предприятиях, так и в рамках учебного процесса вузов.

Существенным преимуществом использования данных малого пространственного разрешения является их регулярность и периодичность. Так, например, данные, полученные со спектрорадиометра MODIS (пространственное разрешение 250, 500, 1000 м в разных спектральных каналах), установленного на борту спутников Terra/Aqua, доступны для каждой точки земной поверхности как минимум каждый день, что увеличивает возможность получения дистанционной информации, свободной от облаков в требуемые периоды времени. В нашей стране наиболее широко ведутся работы по созданию карт растительного покрова глобального масштаба.

Для дешифрирования растительности, ученые используют изображения, полученные в наиболее понятные для анализа состояния растительного покрова сезоны года: летний, поздневесенний и раннеосенний периоды. Количественное обоснование целесообразности использования космических изображений, полученных также и в другие сезоны года (зима, ранняя весна, поздняя осень) не проведено в достаточной мере. Анализ мировых, в том числе российских, исследований показал недостаточную обоснованность выбора оптимального количества зональных космических изображений, обеспечивающих необходимую достоверность дешифрирования растительности.

1. Растительный покров

В широком смысле – растительность Земли играет роль важнейшей составляющей биосферы, являя собой исходную основу питания всего живого, а так же поставщиком кислорода в воздух при помощи фотосинтеза. Понятие растительный покров включает в себя количество растений, густоту и закономерности их распределения на планете Земля.

Растительный покров любого континента и региона складывается в основном из растительных сообществ – фитоценозов, которые распределяются по поверхности Земли в зависимости от количества тепла и влажности. Такие особенности дают основы для широтного, долготного и высотного распространения определенных видов растений и формирования характерных типов сообществ – тундра, тайга, степь, пустыня.

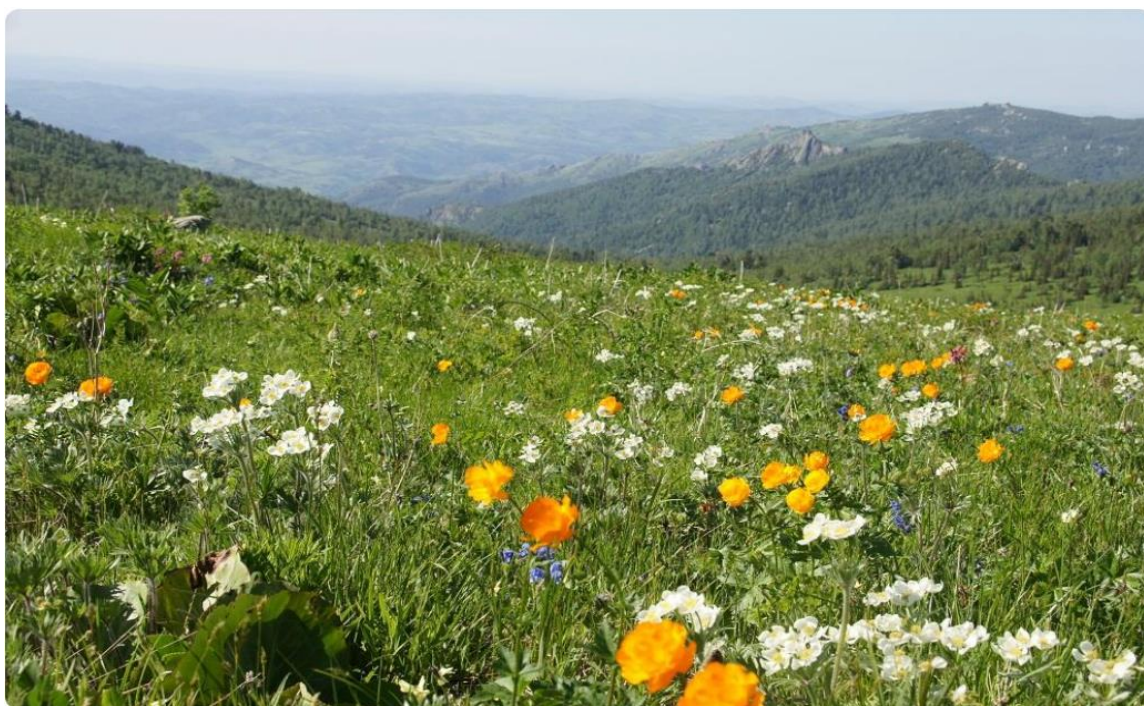


Рис. 1 Высокогорный растительный пояс

Растительный покров любого континента и региона складывается в основном из растительных сообществ – фитоценозов, которые распределяются по поверхности Земли в зависимости от количества тепла и влажности.

Такие особенности дают основы для широтного, долготного и высотного распространения определенных видов растений и формирования характерных типов сообществ – тундра, тайга, степь, пустыня.

Растительный покров представляется правильным рассматривать как совокупность из преимущественно зеленых автотрофных растений населяющих сушу и акваторию планеты Земля. Растительность являет собой функциональный блок биотического покрова поверхности планеты, накапливая из биосферы световую энергию в форме энергии химически связанных продуктов фотосинтеза. Потребляя из атмосферы и гидросферы углекислый газ, растения обогащают атмосферу и гидросферу кислородом. Вместе с тем растительный покров воспринимается людьми как некоторая структура, или упорядоченное разнообразие.



Рис. 2 Иллюстрация процесса фотосинтеза

Структура растений в свою очередь не является ни абсолютно случайной, ни чрезвычайно жесткой и определенной. Постоянность такой структуры представляет собой некий сложный многоуровневый характер типа иерархического ансамбля состояний.

Растительность представляет собой очень динамичную систему, в результате изменения природных и погодных условий эта система может существенным образом в очень сжатые сроки измениться.

Различают коренную растительность (не видоизменённую человеком) и производную растительность (изменённую — к примеру, в результате пожаров и хозяйственной деятельности человека значительная часть пространств, на которых росли тропические леса, сейчас занята саванновой растительностью).

Растительность, сохранившаяся в неизменном виде от более древних эпох, называют реликтовой. К примеру, во влажных тропических лесах некоторые формации существуют в неизменном виде на одном и том же месте с миоцена.

При построении теории организации растительного покрова в науке принято следовать нескольким основным принципам:

- Выделяются элементарные составляющие объекта исследования (в нашем случае такими составляющими служат особи)
- Дискретность элементарных составляющих в пространстве и времени
- Комбинаторный принцип, или ассоциативность объединений элементарных составляющих
- Интерпретируемость комбинаций элементарных составляющих (в нашем случае объединения особей интерпретируются как видовые популяции, экобиоморфы, ценоэлементы, фитоценозы)

- Многоуровневость регулярной структуры, или ее иерархичность.

Особи кооперируются в видовые популяции, поэтому растительный покров можно описать и как взаимосвязь популяций видов растений, населяющих сушу и акваторию. Отсюда определяется возможность растительного покрова существовать в совокупности экобиоморфы а также растений. Комбинирование особей в фитоценозы и ассоциации позволяет определять растительный покров как совокупность фитоценозов и их ассоциаций.

Фитоценоз вырабатывает особенную структуру сообщества в виде ярусности и формирует фитоклимат а также почву. Совокупность подобных фитоценозов образует тип фитоценоза или его ассоциацию – низшую классификационную единицу растительного покрова. В лесных ассоциациях индикаторами являются преобладающие виды деревьев, в лугах – основные виды трав. Современный растительный покров Земли состоит не только из фитоценозов которые являются сообществами чисто природного происхождения, но и из агроценозов, которые являются искусственными сообществами. В процессе увеличения водности, главная роль в фитоценозах фаций переходит от древесных к травяным растениям и затем – мхам.

В начале 20 века человечество потребляло около 1% чистой биосферной продукции, в конце того же века эта цифра увеличилась в 10 раз.



Рис. 3 Наглядная иллюстрация значимости растительного покрова

1.1 Классификация растительности

Систематика растений в широком смысле представляет собой раздел ботаники, изучающий естественную классификацию растений. Растения, обладающие сходными признаками, объединяют в группы, называемые видами и подвидами. Если у особи на территории не обнаруживается близких сородичей, она образует самостоятельный, так называемый монотипный род. Классификация растений представляет собой иерархическую систему из групп различного ранга, то есть из семейств составляющих порядки, а порядки в свою очередь - классы. Вне зависимости от ранга каждая подобная группа называется таксоном. Принципами разделения и классификации таксонов занимается обособленная научная дисциплина - таксономия. Систематика растительности являет собой необходимую основу для любой отрасли ботаники, поскольку она характеризует взаимосвязи между разнообразными видами растений и предоставляет им официальные названия на Латинском языке, которые позволяют специалистам из разных стран вести обмен научной информацией.

Классификация групп растений

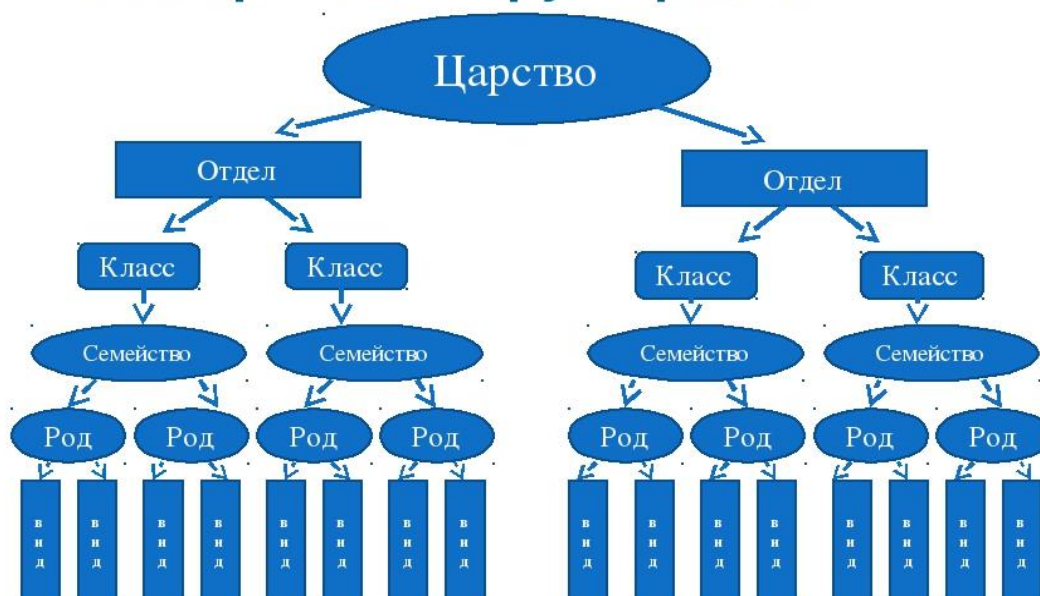


Рис.4 Классификация растений в природе

1.2 Воздействие хозяйственной деятельности человечества на растительность земли

Исходя из темы диссертационной работы, которая заключается в частности в изучении растительного покрова земной поверхности, нельзя не сказать несколько слов о пагубном влиянии хозяйственной деятельности людей на растительный мир. В настоящее время человечество живет в эпоху научно - технического прогресса, который оказывает огромное влияние и на зелёный мир. На перечисление всех видов хозяйственной деятельности, которые оказывают непосредственное и косвенное пагубное влияние на растительность земли можно потратить целую главу. Коснемся лишь некоторых из них.

- Атомная энергетика
- Гидроэнергетика
- Геотермальная энергетика
- Химическая промышленность
- Нефтедобыча и нефтехимическая промышленность
- Лесозаготовки

- Деревообрабатывающая промышленность
- Целлюлозно-бумажная промышленность
- Пищевая промышленность

Научно доказанным фактом является то, что за последние 100 лет в мире, из-за истощения земли выбыло из оборота около 27% сельскохозяйственных угодий. Всемирный Фонд Охраны Дикой Природы подсчитал, что при текущем положении дел уже через 40 лет биоресурсы планеты Земля будут полностью исчерпаны. Хуже всего обстоит ситуация с лесными массивами. Виной тому устаревшие методы природопользования и недостаточно развитая система рекультивации земель. Особенно сильные изменения происходят вокруг крупных городов, где растут большие свалки мусора и отходов.

Постоянное увеличение количества источников загрязнения и объёма выбросов, которое не идёт в сравнение с внедрением новейших систем очистки и фильтрации ведёт к постепенной деградации растительного покрова земли.

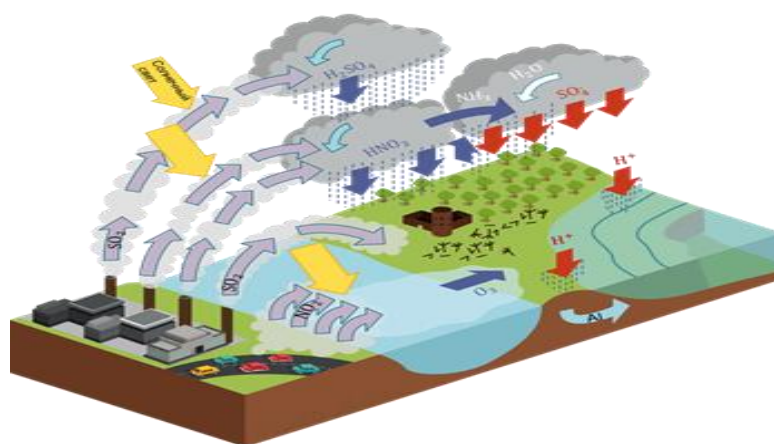


Рис. 5 Наглядная иллюстрация вредоносности хозяйственной деятельности

Для нормального развития и роста растениям требуются определённые условия:

- Необходимая атмосфера: воздух, углекислый газ, кислород;
- Оптимальная температура воздуха и почвы;

- Правильная среда: температура, кислотнo-щелoчное равновесие, влажность;
- Сбалансированное питание минеральными веществами в требуемых количествах и в подходящем для конкретного растения составе;
- Необходимое освещение;
- Достаточное увлажнение.

Введение определенных мер воздействия на обширные поля растительности эффективнее всего производить, основываясь на полученных данных со снимков БПЛА или спутников.

Камеры, установленные на летательных аппаратах выполняющих съемку должны обладать всем необходимым для мониторинга состояния растений оборудованием, в частности – мультиспектральными и гиперспектральными камерами.

1.3 Экологические функции растительного покрова

Исследование растительного покрова земной поверхности представляется важным не только с точки зрения совершенствования процесса сельского хозяйства. Растительность, являясь важным компонентом природных систем, выполняет так же множество экологических функций. Таким образом, мониторинг состояния растительного покрова при помощи спутниковой съемки, для грамотной оценки экологической обстановки, так же несёт собой важную функцию наряду с сельхоз промышленностью. В представленной главе речь пойдет об экологической функции растительности на примере территории России.

В природе растительность, представляя собой составляющую природных систем, выполняет ряд важных функций: экологические, ресурсные, социальные. Экологическая роль растительного покрова проявляется в средообразовании, к которому стоит относить: защитные, стабилизирующие и формирующие.

К виду защитных функций следует относить те функции, благодаря которым значительно ослабляются процессы деградации субстрата, уменьшается его подвижность и динамика рельефа. Одной из наиболее важных защитных функций растительного покрова принято считается – противоэрозионная роль. Сущность данной функции заключается в уменьшении поверхностного стока и размыва почвы. Лесным массивам, произрастающим на наветренных береговых участках и склонах, свойственна ветрозащитная функция, которая в районах с легкой почвой проявляется и как противодефляционная.

Весь растительный покров планеты, особенно лесной, выполняет важнейшую газообменную функцию, выделение кислорода и поглощение углекислого газа, поддерживая жизненно важный для всех организмов баланс газов в атмосфере.

Все леса осуществляют стоко - водорегулирующую функцию. Ее суть заключается в уменьшении поверхностного стока и поддержании стабильного уровня грунтовых вод и влажности почвы, вместе с тем общих запасов воды в речных бассейнах. Лесные массивы, произрастающие в условиях избыточного увлажнения, являют собой - гидромелиораторы, замедляя процессы заболачивания при помощи высокой диссипационной (всасывающей) особенности древесных растений. В северных и высокогорных регионах растительность поддерживает термическую регуляцию между почвой и атмосферой, осуществляя регуляцию температуры в почве и мерзлотастабилизирующую функции. В южных регионах растительность выполняет галомелиоративную функцию, поддерживая слоевой режим почв.

Ландшафтные функции растительного покрова многообразны и на картах отражаются связи растительности с природными режимами территории. Растительный покров выполняет многофункциональную

экологическую роль в природе и обществе. В основе этого подхода лежит представление о ценотическом и экотопическом разнообразии растительных сообществ, выполняющих различные ландшафтные (средоформирующие, средозащитные) и социальные роли в регионе. Базовыми для фитоэкологических карт этой группы являются универсальные карты растительности, отражающие взаимосвязи растительных сообществ с условиями природной среды.

Картографирование экологических функций растительности основывается на анализе природных факторов, обуславливающих закономерности распределения растительных сообществ, и на установлении обратных связей, отражающих влияние сообществ на свойства экотопов. Далее, в более наглядном табличном виде будут приведены главные функции растительного покрова.

Таблица 1.3.1 Главные функции растительного покрова.

Ландшафтнозащитные	Ресурсные
А. Защитные функции растительности естественных ландшафтов.	В. Ресурсные функции растительности (побочного использования)
1. Водосборная (в гольцах)	9. Биостациональная (кормовая база и станции обитания соболя и белки)
2. Водорегулирующая	10. Орехопромысловая
3. Противозероэрозийная	Г. Ресурсные функции растительности сельскохозяйственного использования
4. Мерзлотостабилизирующая	11. Оленепастбищная (в высокогорьях)
5. Противолавинная	12. Потенциально сельскохозяйственная
Б. Защитные функции растительности антропогенных ландшафтов	13. Сельскохозяйственные угодья
6. Дорожно - защитная	Д. Древесноресурсные функции (по хозяйственным секциям)

7. Рекреационная	На равнинах: Сосновая, Лиственничная, Березовая и тд.
8. Санитарно - гигиеническая	В горах: Сосновая, Лиственничные, Березовые и тд.

Биостациональная функция таежных лесов предполагает использование их в качестве кормовой базы и станций обитания ценных животных. Высокими биостациональными свойствами обладают средневозрастные и спелые леса с большим количеством экологических ниш, позволяющих обеспечить обильную пищу, жилище, защиту от неблагоприятных условий большому количеству животных (копытным, птицам, пушным зверям, мелким млекопитающим). При нарушении таежных лесов (вырубки, пожары, рекреация). Численность промысловых животных (соболя, белки) резко сокращается.

Рассматриваются также рекреационные, санитарно-гигиенические, эстетические, бальнеологические и другие важные социальные экологические функции растительных сообществ. Оценка экологических функций растительности рассматривается как часть рационального использования природных ресурсов и их охраны в рамках государственных программ, в качестве реализации устойчивого развития производительных сил регионов. Биологические ресурсы имеют приоритетность в экономическом потенциале многих регионов страны.

Ресурсные карты растительности показывают растительный покров под соответствующим углом зрения. На этих картах поэлементный показ типов растительности (лесные, луговые, степные, болотные) сопровождается, помимо определения их ботанической сути, описанием характерных свойств, связанных с использованием растительного сырья.

Карты лесной таксации показывают распространение различных по породному составу типов лесов с характеристикой их производственных

показателей: состава древо- стоев, возраста, высоты и диаметра стволов, преобладающих в них пород, бонитета насаждений, прироста, запаса древесины.

Карты торфяного фонда раскрывают ботаническую характеристику болотных массивов с отражением качества и запасов торфов.

Базовые карты растительных ресурсов имеют большое значение для оценки экономического потенциала биологических ресурсов регионов. Они могут быть использованы при составлении производных карт охотничьих угодий и выхода продукции (с единицы площади) охотничье-промысловых ресурсов, определения запасов пищевых, лекарственных, технических и других дикорастущих полезных растений. Особое внимание в последние годы было уделено оценке биологического разнообразия и хозяйственной значимости в экономическом потенциале регионов пойменных, озерных и других водно-болотных угодий.

1.4 Картографирование растительного покрова земной поверхности

Состояние растительного покрова выбранной территории может быть отражено как в описываемой форме, посредством передачи информации в виде текстовых характеристик, так и на карте. При исследовании растительности метод картографирования является основным, так как позволяет получить наглядное, ёмкое, пространственно структурированное представление о составе и распространении растительных сообществ. Передача текстовой информации становится все более громоздкой, трудно реализуемой, тогда как картографическое её представление более понятно и может быть подвергнуто количественному анализу. Картографирование растительности является фундаментальным инструментом для получения знаний о растительном покрове Земли и его связи с окружающей средой.

Сама по себе - карта растительности представляет собой графическое изображение пространственной структуры элементов растительного покрова.

В настоящее время наиболее применяемыми являются универсальные карты растительности, которые отображают современное состояние растительного покрова, на основе них выполняются различные тематические проекты, позволяющие оценить воздействие на окружающую среду тех или иных факторов и процессов, носящих как антропогенный, так и природный характер.

Классификация земного покрова включает в себя разделение земного покрова на типы: травянистые культуры, кустарниковая растительность, смешанные или многоярусные культуры, искусственные поверхности, древовидные культуры луга и пастбища, лесной покров, мангровая растительность, находящаяся в водной среде или регулярно затопляемая - кустарниковая и травянистая растительность, внутренние водоёмы, прибрежные водоёмы и приливные зоны.

1.5 Развитие спутникового картографирования растительного покрова в России

В последние десятилетия в России на орбиту было выведено несколько космических аппаратов. Спутник Монитор-Э был запущен в августе 2005 года и обладает пространственным разрешением 8 м в панхроматическом режиме и 20 м в 3-х мультиспектральных каналах. Канопус-В был выведен на орбиту 23 июля 2012 года и обладает пространственным разрешением 2,1 м в панхроматическом режиме и 10,5 м в 4-х мультиспектральных каналах. Аист-2Д находится на орбите, с 28 апреля 2016 года имеет пространственное разрешение 1,5 м в панхроматическом режиме и 5 м в мультиспектральных каналах.

Основными задачами, данной группировки спутников является: тематическое картографирование, контроль чрезвычайных ситуаций, мониторинг земной поверхности, сельскохозяйственных культур наряду с прогнозом урожайности, контроль состояния лесов, геологическое картирование и поиск полезных ископаемых, обнаружение лесных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ, прогнозирование землетрясений.

В начале 2000-х годов в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) была освоена автоматическая технология непрерывного обновления архива данных MODIS, используемых как основы для разработки целого множества тематических карт, характеризующих растительность России. В то же время получили развитие автоматические методы управления потоковой обработкой крупных массивов спутниковых данных.

К числу отличительных черт развиваемой методологии спутникового картографирования растительного покрова можно отнести следующие основные положения:

- Нацеленность на разработку методов и технологий автоматической обработки данных ДЗЗ, способных обеспечить полную воспроизводимость результатов картографирования;
- Ставятся задачи разработки алгоритмов адаптивной тематической обработки результатов ДЗЗ, которые способны обеспечить оператора оптимальной локализованной самостоятельной настройкой параметров, зависящих от пространственного нахождения объекта картографирования и времени процесса спутниковых наблюдений;
- Применяемость разрабатываемых методов в сфере картографирования растительности на крупных территориях вплоть до глобального охвата (крупные государства, континенты и планета в целом);

- Возможность получения однородных временных рядов спутниковых изображений, которые способны охарактеризовать динамику растительности (концепция динамического картографирования).

Рассмотрение возможностей о получении на основе данных ДЗЗ информации о растительности показывает, что в существенной степени они определены многими физическими, техническими и методическими предпосылками, такими как:

- Взаимосвязь интенсивности отражения от типа земной поверхности, ее структурных, а также физико-химических характеристик в первую очередь, и, во вторых, длинны волн электромагнитных излучений, время и угловых условий наблюдения;
- Возможности спутниковой индикации отраженного излучения как функции параметров наблюдения упомянутых выше.

1.6 Карта растительного покрова России TerraNorte RLC, полученная по данным Terra-MODIS 2015 года

Одним из этапов разработанного метода является предварительная обработка многолетней временной серии данных MODIS с целью снижения влияния мешающих факторов, таких как облака и образуемые ими тени, сезонный снежный покров и аппаратные шумы.

В настоящее время для создания серии карт растительного покрова России используются данные MODIS, полученные в период 2000–2015 годов. Предварительная обработка ежедневных данных MODIS позволяет в значительной мере скомпенсировать влияние мешающих факторов и дает возможность построения композитных изображений за различные промежутки времени с редуцированным влиянием облаков, сезонного снежного покрова и аппаратных шумов. На данный момент сформированы двухмесячные композитные изображения чистой поверхности за весенний,

летний и осенний период каждого из рассматриваемых лет, включающие значения КСЯ в красном, ближнем и среднем ИК каналах.

Также по данным MODIS за период с 1 ноября по 31 марта следующего года сформированы зимние композитные изображения, полученные путем осреднения значений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах для пикселей с выявленным наличием снежного покрова. Совокупность описанных выше композитных изображений позволяет достаточно хорошо описывать сезонную динамику спектрально-отражательных характеристик большинства типов земного покрова и используется при классификации в качестве признаков их распознавания.

Распознавание типов растительного покрова осуществляется с использованием совокупности полученных по данным MODIS и описанных выше признаков на основе алгоритма локально-адаптивной классификации с обучением LAGMA.

Разработанная легенда созданной карты растительного покрова России включает в себя 23 тематических класса, образующих шесть различных групп земного покрова, а именно:

Таблица 1.6.1 «Леса»;

1) Темнохвойные вечнозеленые насаждения, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют теневыносливые виды хвойных деревьев, включая ель, пихту и сибирскую сосну (кедр).	2) Светлохвойные вечнозеленые насаждения, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют деревья сосны обыкновенной.
3) Лиственные насаждения, в пологе которых не менее 80% площади занимают кроны березы и осины, а также широколиственных пород, включая дуб, липу, ясень, клен, вяз и некоторые другие виды.	4) Смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород, в которых кроны хвойных деревьев занимают от 60% до 80%, а лиственных – от 20% до 40% площади полога.
5) Смешанные насаждения, в которых площади крон хвойных и лиственных пород деревьев представлены примерно в равных пропорциях (40–60 %) в пологе.	6) Смешанные насаждения с преобладанием лиственных пород, в которых кроны лиственных пород деревьев занимают от 60% до 80%, а хвойных – от 20% до 40% площади полога.
7) Хвойные листопадные (лиственничные) насаждения, в пологе которых кроны	8) Редины хвойные листопадные (лиственничные), представляющие собой

деревьев лиственницы занимают более 80% площади.	участки, занятые отдельно стоящими деревьями или разреженными насаждениями лиственницы с проектным покрытием крон менее 20%.
--	--

В то же время травяно-кустарниковая растительность включает в себя:

- Луга, травяная растительность с продолжительностью вегетационного сезона более 5 месяцев, видовой состав которой характеризуется господством многолетних трав, главным образом злаков и осоковых, в условиях достаточного увлажнения. Площадь проекции крон деревьев и кустарников на земную поверхность составляет менее 20%.
 - Степи, травяной покров образован преимущественно засухоустойчивыми многолетними дерновинными злаками (ковыль, типчак, полынь, житняк и др.). Встречается большое разнообразие видов степных кустарников и полукустарников, а также короткоцветущих эфемероидов и эфемеров.
 - Хвойные вечнозеленые кустарники, кустарниковые заросли или низкоствольные леса из кедрового стланика.
 - Лиственные кустарники, сообщество низкорослых и стелющихся кустарников (кустарниковых или карликовых берез, полярных ив и др.).
- Тундровая группа земного покрова включает в себя следующие компоненты:
- Кустарничковая тундра, сухая тундра с редкой фрагментарной растительностью, среди которой доминируют виды альпоарктических кустарничковых сообществ высотой менее 15 см. Распространены также мохово-лишайниковый покров и разнотравье.
 - Травянистая тундра представлена главным образом различными видами трав и мхов, произрастающими на сырых почвах и образующими сплошной растительный покров. Встречаются кустарнички высотой до 40 см.

- Кустарниковая тундра с доминированием кустарников (карликовая береза и различные виды ивы) высотой более 40 см, иногда с примесью можжевельника, ольхи или кедрового стланика.

Следом идут водно-болотные комплексы включающие в себя:

- Болота – территории, характеризующиеся избыточным увлажнением с преобладанием растительного покрова из мхов, лишайников, тростника, осоки и некоторых других видов. Часто встречаются участки с наличием редкого (< 20%) древесного полога.
- Прибрежная растительность – гидрофильная травяная и древесно-кустарниковая растительность по берегам водоемов, часто периодически затопляемая.

Далее располагаются прочие типы растительного покрова, такие как:

- Свежие гари – лесные гари, появившиеся в течение последних пяти лет. Могут содержать погибшие деревья и некоторое присутствие вторичной растительности.
- Пахотные земли – регулярно обрабатываемые в течение последних пяти лет земли сельскохозяйственного назначения.

И в заключении идут не покрытые растительностью земли, такие как:

- Вечные снега и льды – земли, покрытые снегами и льдами в течение всего года.
- Открытые грунты и выходы горных пород – земли, суммарное проективное покрытие которых растительностью всех видов не превышает 20%.
- Урбанизированные территории – населенные пункты, дороги и другие образования антропогенного происхождения.
- Водные объекты – речные и озерные внутренние водоемы, а также прибрежные участки открытой воды.

Метод локально-адаптивной классификации LAGMA предусматривает использование репрезентативной выборки обучающих данных, обеспечивающих оценку признаков распознаваемых классов на картографируемой территории. В качестве возможных источников данных для формирования обучающей выборки могут использоваться, в частности, существующие тематические карты.

Однако при использовании существующих карт необходимо учитывать, что получаемая на их основе обучающая выборка, как правило, требует предварительной фильтрации в силу таких причин, как:

- возможные ошибки картографирования;
- изменения земного покрова с момента создания опорной карты;
- различия величин пространственного разрешения опорной карты и используемых спутниковых данных.

В качестве опорной карты для формирования обучающей выборки была использована карта наземных экосистем Северной Евразии, созданная на основе полученных в 2000 году спутниковых данных SPOT-VEGETATION, имеющих пространственное разрешение около 1 км.

При формировании обучающей выборки был использован итерационный подход, предусматривающий ее коррекцию по результатам многократного использования процедуры классификации и экспертной оценки получаемых результатов. При этом формирование начальной обучающей выборки предусматривало несколько этапов фильтрации пикселей опорной карты с целью исключения макроскопических ошибок.

В табл. 1.6.2 представлен объем опорной выборки для различных типов земного покрова. Пример карты растительного покрова России за 2015 год представлен на рис.7.

На рисунке 5, можно оценить изменение площади лесного покрова России с начала нынешнего столетия. Следует отметить, что в последние годы идет непрерывное сокращение площади хвойных лесов (рис.8), частично замещаемых лиственными породами.

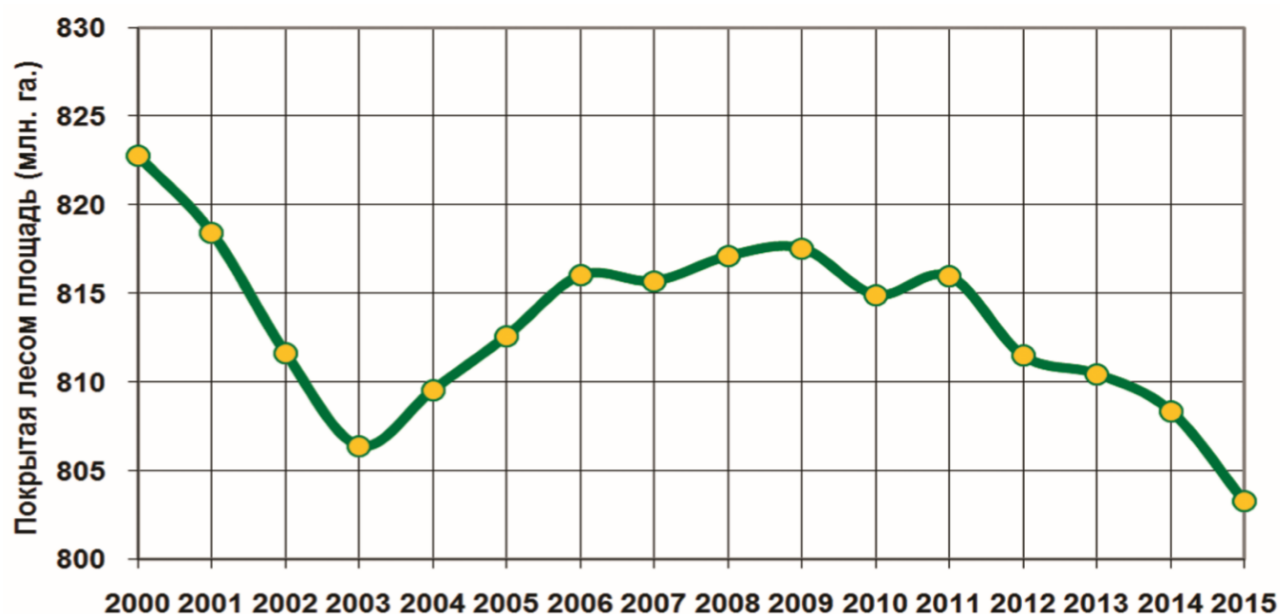


Рис.5 Динамика изменения покрытой лесом площади по времени.

Таблица 1.6.2 Характеристика опорной выборки и оценка площади различных типов земного покрова в 2015 году.

Тип растительности	Опорная выборка			Результат картографирования
	Число пикселей(тыс.шт)	% площади выборки от площади классов на карте	Площадь(тыс.км ²)	% общей площади
Леса				
Темнохвойные вечно-зеленные	8692,8	56,6	812,9	4,8
Светлохвойные вечно-зеленные	6812,4	34,6	1041,2	6,1
Лиственные	11085,0	42,6	1376,5	8,1
Смешанные с преобладанием хвойных	2443,0	25,7	502,0	3,0
Смешанные	1427,9	17,5	431,3	2,5
Смешанные с преобладанием	2864,4	30,3	500,2	2,9

хвойных				
Хвойные листопадные	18244,4	37,3	2590,7	15,3
Редины хвойные листопадные	1057,2	6,8	821,2	4,8
Общая площадь лесов	52627,1	34,5	8076	47,5
Травянисто-кустарниковая растительность				
Луга	2535,6	9,8	1367,7	8,1
Степи	2498,4	38,9	339,6	2,0
Хвойные, вечнозеленные кустарники	1948,4	20,8	495,4	2,9
Лиственные кустарники	190,1	3,6	282,6	1,7
Тундра				
Кустарничковая	2297,5	20,7	586,8	3,5
Травянистая	7242,0	33,4	1147,6	6,8
Кустарниковая	3339,1	19,1	925,0	5,4
Водно-болотные комплексы				
Болота	9723,3	34,1	1508,8	8,9
Прибрежная растительность	2498,4	22,8	109,0	0,6
Общая площадь	16984,3км ²			100%

	Современная естественная растительность	Экологические функции
Тундры		
1	Кустарничково-травяно-моховые	Почвотерморегулирующая, противозерозийная
2	Кустарниковые	Почвотерморегулирующая, противозерозийная, снегонакопительная
3	Кочкарные осоково-пушицево-моховые	Почвотерморегулирующая, противозерозийная, торфотормирующая
4	Горные разреженные тундры и каменистые россыпи	Водосборная
5	Горные тундры и кустарниковые заросли	Водосборная, противоденудационная
Стланики и редколесья		
6	Кедровый и ольхово-кедровый стланик, субальпийские хвощовые и кустарники	Противоденудационная, снегонакопительная, противопавинная
7	Горные лиственничные редколесья	Мерзлостабилизирующая
Хвойные таежные леса		
8	Лесотундра	Противозерозийная
9	Темнохвойные и отчасти сосновые	Стокорегулирующая, газообменная
10	Лиственничные	Мерзлостабилизирующая, газообменная
11	Сосновые на легких почвах	Стокорегулирующая, газообменная, противодефляционная
12	Сосновые и лиственничные заболоченные	Гидромелиоративная, газообменная
13	Горные темнохвойные	Противоденудационная, противопавинная, газообменная
14	Горные лиственничные	Мерзлостабилизирующая, противоденудационная, газообменная
15	Долинные леса и кустарниковые заросли	Водоохранная, водорегулирующая

Мелколиственные (подтаежные и вторичные таежные) и широколиственные леса		
16	Хвойно-широколиственные и широколиственные	Стокорегулирующая, газообменная, гумусоформирующая, противозерозийная
17	Мелколиственные	Стокорегулирующая, газообменная, гумусоформирующая
18	Горные хвойно-широколиственные и широколиственные	Противоденудационная, газообменная, гумусоформирующая
Степи		
19	Лесостепь (широколиственные, мелколиственные леса и луговые степи)	Стокорегулирующая, черноземопочвоформирующая
20	Настоящие разнотравно-злаковые и злаковые (сухие) степи	Черноземопочвоформирующая, каштаново-почвоформирующая, противозерозийная
21	Нагорноксерофитностепная растительность	Противоденудационная
Опустыненные степи и пустыни		
22	Полынно-злаковые и полынные	Противозерозийная
Луга		
23	Пойменные луга	Гумусоформирующая, седиментационная
24	Галофитнолуговая растительность	Галомелиоративная
25	Высокогорные луга	Водосборная, гумусоформирующая
Болота		
26	Болота	Водонакопительная, торфотормирующая
Уничтоженная растительность (сельскохозяйственные земли на ее месте)		
	Уничтоженная растительность (сельскохозяйственные земли на ее месте)	Потенциальные функции

Рис.7 Легенда к карте, содержащая информацию как о самой растительности, так и о свойственных каждому выделу экологических функций.

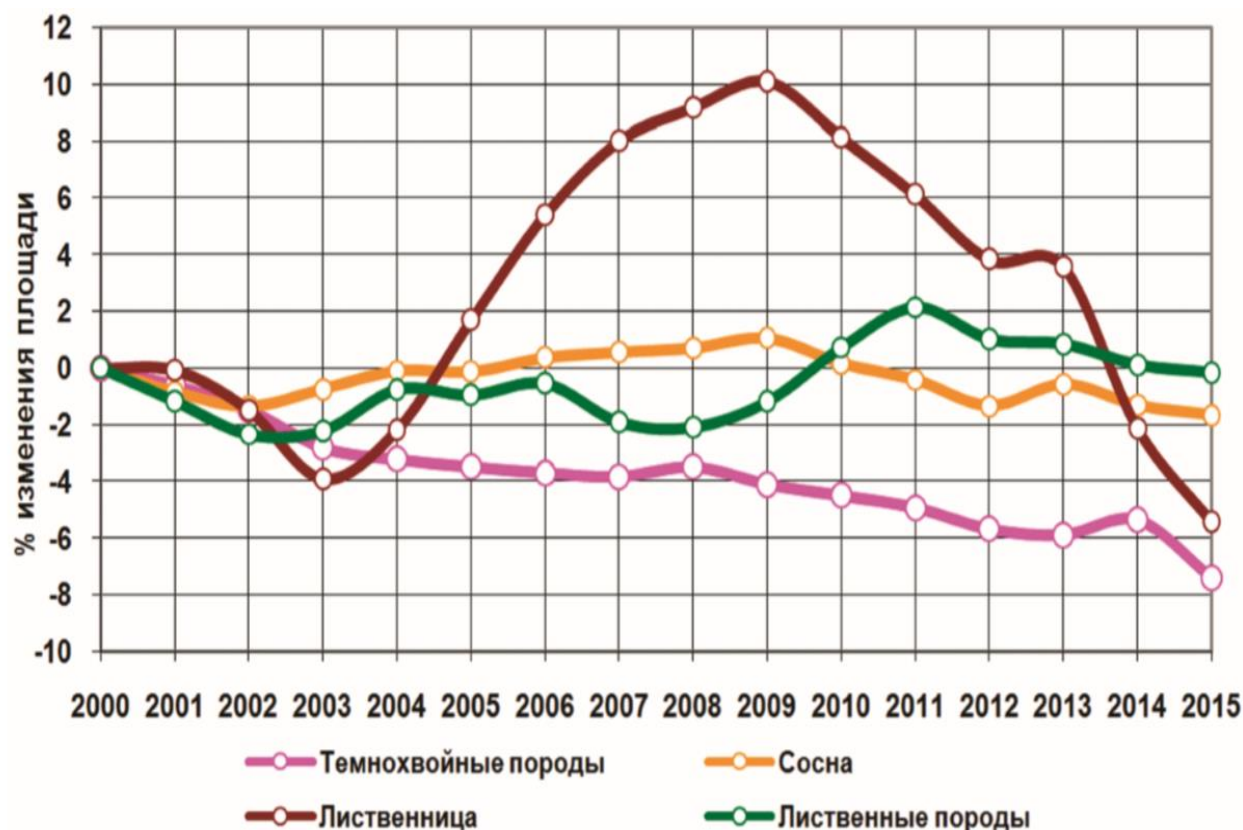


Рис.8 Относительное, процентное изменение площади лесов различных пород

1.7 Международная группировка спутников дистанционного зондирования земли

В наше время открыты весьма хорошие возможности для получения данных ДЗЗ, доступно большое количество источников спутниковых данных разного пространственного разрешения.

- Снимки небольшого пространственного разрешения. Их получают американские MODIS, которые установлены на таких спутниках как Terra, Aqua, (разрешение 250, 500, 1000м).
- Американские радиометры AVHRR(Advanced very-high-resolution radiometer) на спутниках серии NOAA (разрешение 1000 м);
- Китайские 20-ти каналные радиометры MERIS на спутниках серии Feng-Yun (пространственное разрешение 250, 1000 м).
- Также для исследования доступны данные среднего пространственного разрешения, которые получают со следующих спутников:
 - Sentinel (США, 10/20/60 м);
 - Landsat-5,7,8 (США, 15/30/100 м);
 - KazEOSat-2 (Казахстан, 6,5 м);
 - FORMOSAT-2 (Тайвань, 2/8 м);
 - Spot -2,4 (Франция, 10/20 м);
 - UK-DMC2 (Франция, 22 м);
 - ALOS (Япония, PRISM/AVNIR-2, 2,5/10 м).

За прошедшие 10-15 лет на орбиту было запущено несколько спутников сверхвысокого пространственного разрешения (в скобках указаны страна-оператор, год запуска, а также пространственное разрешение в разных режимах):

- RapidEye (Германия, 2008, 5 м);
- Pléiades-1A/1B (Франция, 2011г./2012 г., 24 0,5/2 м);
- Ikonos (США, 1999-2015 гг., 0,82/3,2 м);
- OrbView (США, 2003-2007 гг., 1/4 м);

2. Основные понимания о дистанционном зондировании Земли

Понятие о дистанционном зондировании, в широком смысле, представляет собой способы получения информации об объекте на расстоянии без вступления с ним в прямой контакт, то есть без непосредственного контакта приемных чувствительных элементов аппаратуры с поверхностью исследуемого объекта.

К методам дистанционного зондирования относятся все методы бесконтактного получения информации, такие как сейсморазведка, гравиразведка и так далее. Среди них особое место занимают методы ДЗЗ путём применения космических спутников.

Под дистанционным зондированием (Remote Sensing) Земной поверхности, подразумевается наблюдение и измерение энергетических и поляризационных характеристик излучения объектов в различных диапазонах электромагнитного (ЭМ) спектра с целью определения местоположения, вида, свойств и временной изменчивости объектов окружающей среды без прямого контакта с ним измерительного прибора.

ДЗЗ имеет широкий круг приложений, начиная с военной разведки. В невоенной сфере большинство приложений относятся к категории исследования окружающей среды:

1. Атмосфера: температура, осадки, распределение и тип облаков, концентрации газов и так далее.
2. Земная поверхность: топография, температура, альбедо, влажность почвы, тип и состояние растительности, антропогенные нагрузки.
3. Океан: температура, топография, цвет водной поверхности (планктон) и так далее.
4. Криосфера: распределение, состояние и динамические подвижки снега, морского льда, айсбергов, ледников.

Исторически один из наиболее развитых способов получения информации об объектах земной поверхности - это сбор информации «в поле». Сплошное изучение значительных по площади территорий методами наземной съемки требует огромных экономических и временных затрат. Необходимо отметить, что при наземных исследованиях трудно добиться синхронности, одновременности наблюдений на всех участках. Ко всему этому зачастую добавляется такой фактор, как труднодоступность территории.

Этих недостатков лишены методы ДЗЗ. Одной из наиболее важных характеристик ДЗЗ является возможность накапливать данные о большой области земной поверхности или объеме атмосферы за короткий промежуток времени, получая практически моментальный снимок. Например, с помощью сканера на геостационарном метеорологическом спутнике Meteosat изображение примерно в четверти поверхности Земли формируется менее чем за полчаса. Если этот аспект рассматривать в сочетании с тем фактором, что с помощью спутниковых систем можно получать данные в ситуациях сложных для наземных исследований, когда они медленны, дороги опасны, по политическим мотивам, то потенциал ДЗЗ становится ещё более очевидным. Дополнительным преимуществом ДЗЗ является возможность систем выдавать калиброванные данные в цифровом виде, в этом случае они могут быть введены прямо в компьютер для обработки.

В современных условиях востребованность в космических снимках определяют следующие их характеристики:

- Объективность, каждый КС является документом, объективно отражающим состояние местности на момент съемки. Подделать КС практически невозможно, так как съемку ведут различные компании - операторы и попытки изменения данных могут быть легко обнаружены.

- Актуальность - материалы космической съемки можно получить на различные даты, включая съемку на заказ, которая осуществляется, как правило, в течении нескольких недель.
- Масштабность - современные приборы ДЗЗ позволяют одновременно снять значительные по площади территории с довольно высокой степенью детализации.
- Экспериментальность - участки съемки никак не привязаны к государственным и территориальным границам и для проведения съемки не требуется разрешение.
- Доступность - в настоящее время данные ДЗЗ с пространственным разрешением в 2 м и ниже являются открытыми. Процедура заказа и получения снимков достаточно проста.

Данные ДЗЗ, особенно полученные с космических спутников, зачастую нельзя получить никаким другим способом. Современная служба погоды в значительной мере основана на наблюдениях со спутников.

Следует отметить, что чем больше территория государства, тем более эффективно применение дистанционных методов.

Доступ к массивам данных о дистанционном зондировании Земли регулируется так называемой политикой «открытого неба» (Open Sky Policy). Основным международным консультативным органом координации политики в области дистанционного зондирования Земли является «CEOS», (Committee on Earth Observation Satellites).

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли являются источником актуальной и оперативной пространственной информации и широко используются для развития арктических и субарктических регионов России. ДЗЗ приобретают особое значение, т.к. в связи с труднодоступностью, широким промышленным освоением и уязвимостью экосистемы северных регионов, ДЗЗ из космоса становится одним из наиболее эффективных инструментов решения задач.

2.1 Физические основы дистанционного изучения растительного покрова

Дистанционное зондирование земли ДЗЗ – является собой процесс наблюдения, а также измерения характеристик объектов земной поверхности при помощи использования данных, полученных без непосредственного контакта с объектами. При помощи камер регистрирующих различные спектры изображения, установленных на летательных воздушных или космических аппаратах, суднах, подводных лодках.

Наиболее высокое распространение получило использование ДЗЗ в виде двумерной пространственной сетки, полученной при помощи воздушных летательных и космических аппаратов. Датчики, установленные на воздушных и космических аппаратах, фиксируют поляризационные и энергетические характеристики собственного и отражённого излучения объектов суши, атмосферы и океана земной поверхности и передают их по телеметрическим каналам в виде электромагнитных сигналов или в виде фотоплёнок.

Фиксируемые показатели излучения находятся в строгой зависимости от состояния и свойств выбранного объекта, его ориентации в пространстве, это способствует дистанционной идентификации. Все объекты имеют свой уникальный спектр, соответствующий их химическому составу: при падении на изучаемый объект солнечных лучей, некоторый процент лучей определённых длин волн поглощается, некоторые волны - отражаются. Сенсорная регистрация некоторых свойств отражённого и собственного излучения дает возможность интерпретировать зафиксированные объекты земной поверхности их свойства. Наиболее сильные помехи при обработке данных полученных дистанционным зондированием и распознавания объектов, является собой облачность. В любой момент времени облаками будет покрыто не менее 50% поверхности всей земной поверхности.

Атмосферная облачность понижает контрастность отображения объектов на аэрокосмических изображениях, искажает цветопередачу, при этом автоматическая и корректная обработка территорий, которые закрыты атмосферной облачностью, невозможна. Наличие в атмосферном слое озона, углекислого газа, водяного пара, оксидов азота а также неких других веществ объясняет явление рассеяния и поглощения солнечного излучения атмосферой [1]. Различные вещества, входящие в состав атмосферы поглощают излучение при определенных длинах волн. На Рисунке 6 - отрезки этих длин излучения выглядят как «провалы». Максимумы графика описывают некоторые части спектра, где спектр проходит через атмосферу с наименьшим ослаблением: $\lambda = 0,3-1,3$ мкм, $\lambda = 1,5-1,8$ мкм, $\lambda = 2-2,6$ мкм, $\lambda = 3-4,2$ мкм, $\lambda = 4,5- 5,5$ мкм, $\lambda = 7,5-14$ мкм. Такие области обозначают как «окна прозрачности» атмосферы. Исходя из всего этого представляется разумным проводить дистанционную съемку непосредственно в таких областях спектра, которые умещаются в «окна прозрачности» атмосферы, когда не случается поглощения электромагнитного излучения.

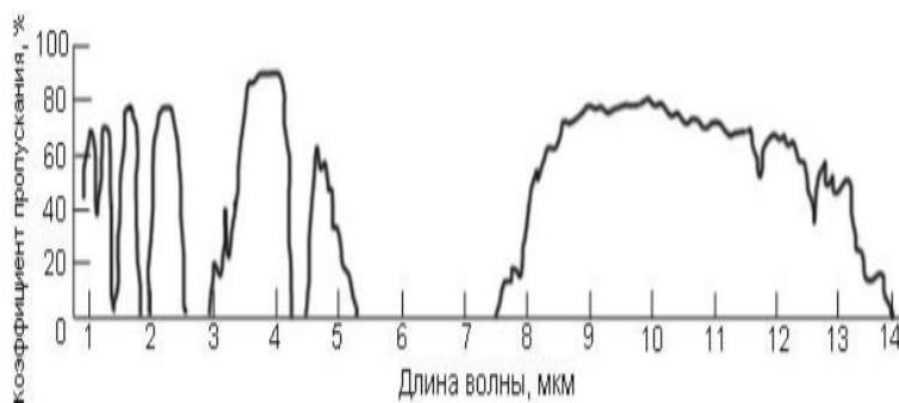


Рис.6 Количество излучения, проходящего через слой атмосферы, в процентах.

В наше время разнообразие устройств применяемых при съемке весьма большое, так же как и число задач, разрешимых при их помощи, но в целом допускается возможным объединить их под одним общим названием сенсоры (от англ. sensor — чувствительный элемент). Они включают в себя радиолокаторы, видеокамеры, фотографические камеры, сканеры.

2.2 Основные задачи ДЗЗ в мониторинге состояния растительности

Инвентаризация растений, определение основной информации о структуре и составе. В широком смысле это может быть картографирование, в узком смысле это создание карт на основе сведений о распределении единиц растительности различного масштаба – от отдельных видов до формаций (последнее, в основном, получается за счёт использования снимков большого разрешения или методами индикационных картографирований – с использованием технологии моделирования распределения видов – Species Distribution Modelling).

Количественная оценка, то есть получение метрик, численно отражающих требуемый параметр, на основе спектральных индексов. С помощью космических снимков можно оценить большое число параметров: биологическое разнообразие, биомассу, сомкнутость крон, фотосинтетическую активность, индекс LAI и даже содержание некоторых элементов, например азота. Моделирование и прогнозирование распределения отдельных элементов растительного покрова, изменения границ сообществ и т. д. В этих процессах данные дистанционного зондирования могут выступать как количественные или качественные входные данные или как основа для экстраполяции результатов моделирования.

Оценка и картографирование параметров среды (например, влажности почв; водоемов или болот – как мест обитания определенных видов или типов растительности), антропогенного влияния (дороги, вырубки и другие нарушения, влияющие на распределение элементов растительного покрова), угроз.

2.3 Современные методы получения космических изображений

Одним из основных источников получения дистанционной информации об объектах земной поверхности на сегодняшний день являются космические системы. Они включают в себя следующие элементы [2]:

- Космический аппарат;
- Средства регистрации и накопления данных ДЗЗ на борту носителя;
- Бортовая аппаратура ДЗЗ, установленная на аппарате;
- Средства передачи информации на наземные пункты приёма;
- Наземные центры обладающие средствами для обработки космической информации.

Сенсор, который установлен на космическом аппарате, фиксирует отражённую от Земли энергию, приводит к виду электрического сигнала и выдает сигнал в виде кода, удобного для передачи по доступным каналам связи на земной комплекс приема и обработки информации.

Важнейшим показателем, который характеризует некоторую систему сбора дистанционной информации, будет - разрешающая способность сенсора. В науке принято выделять четыре типа разрешения: временное, яркостное, спектральное, пространственное.

Возможность проведения съемки одновременно в нескольких диапазонах – объясняет преимущество ДЗЗ для изучения земной поверхности, в частности - растительных покровов. Каждый отдельный спектральный канал имеет различную информативность и применяется для решения разных задач по исследованию растительности: выявление породного состава леса, расчет объема растительной биомассы и урожайности сельскохозяйственных культур, определение объема влаги в растениях и обнаружение подверженных засухе либо переувлажнению растительных семейств, индикация лесных пожаров, вырубки, растительности, подверженной болезням и другие.

Значения спектрального разрешения определяются характерными отрезками длин волн электромагнитного спектра, к которым чувствителен сенсор. В зависимости от применяемых отрезков электромагнитного спектра излучения, а также их качества, получаемые с помощью средств ДЗЗ снимки делят на:

- Полученные путем использования оптико-электронных систем, панхроматические, многозональные, гиперспектральные, (обычно более 128) узких диапазонов электромагнитного спектра;
- Радиолокационные (получены из нескольких участков радиодиапазона 1 мм – 1 м с различной поляризацией излучения).

Пространственное разрешение является линейным размером участка на земной поверхности, который представлен каждым пикселем. Разрешение – это минимальная линейная либо угловая величина полученного объекта местности, фиксированная пикселем.

Радиометрическое либо яркостное разрешение – представляет собой общее число выявляемых кодированных значений (показатель квантования) спектральной яркости в файле значений для каждой спектральной зоны, указываемое количеством бит, число полутонов серого тона на изображении: 1 бит будет равен двум градациям серого, 2 бита – четырем, 8 бит – 256.

Временное разрешение зависит от частоты получения изображений с выбранной территории. Большинство спутников производят съёмку раз в несколько дней, а некоторые – раз в несколько часов.

Общеизвестной датой начала массового использования данных ДЗЗ в мирных целях – в частности метеорологических целях, эко-мониторинге, для исследования природных ресурсов – не военной разведки, считается 1972 год, который положил начало функционирования американской орбитальной системы Landsat.

Landsat являет собой наиболее продолжительную программу, в рамках данных исследований было собрано огромное количество многозональных снимков. В последнее время развитие проекта позволило успешно запустить 7 новых спутников.

Первый спутник Landsat 1 был выведен на орбиту для того, чтобы аккумулировать материал многозональной и периодически повторяющейся съёмки, пригодной для программной обработки в целях геологического картирования, разведки месторождений полезных ископаемых, решения сельскохозяйственных, лесохозяйственных и сельскохозяйственных задач, экологического мониторинга растительного покрова. Landsat 1, изначально носил название «ERTS» (Earth Resources Technology Satellite). Выводился на орбиту 23 июля 1972 г., закончил свою работу 6 января 1978 г. На нем были установлены 2 прибора: трёх камерный видикон с возвратным потоком RBV (Return Beam Vidicon), он предназначался для получения фотографических изображений Земли в видимом и коротковолновом инфракрасном излучении.

Запуск спутника Landsat 4 был произведен NASA 16 июня 1982 года. Данный аппарат сильно отличался от трёх первых, на нём на борту не было видикона RBV, но он оснащался новейшим прибором Thematic Mapper (TM) с девятью спектральными диапазонами и более высоким масштабным разрешением (30 м во всех каналах кроме теплового).

2 мая 1985 года NASA произвели запуск Landsat 5. Оборудованный приборами TM и MSS, он доставлял данные ДЗЗ - 28 лет 10 месяцев, поставив рекорд срока активного использования спутников ДЗЗ. В феврале 2013 г. приемники спутника были отключены. В июне 2013 года Landsat 5 был выведен из эксплуатации окончательно. Начиная с 1998 года управление спутниками Landsat 4, 5 было передано Геологической службе США.

7 ноября 1992 года был произведен провальный запуск спутника Landsat 6. В апреле 1999 года был произведен успешный запуск спутника из серии – Landsat 7, на борту которого устанавливался девятиканальный сканирующий многозональный радиометр (ETM+).

В феврале 2013 года NASA и USGS произвели совместный запуск Landsat 8, оснащённого двумя приборами: (OLI) и (TIRS), которые открывали возможность получения изображений земной поверхности в восьми каналах спектра с разрешением в 30 м. Соотношение диапазонов спектральных каналов Landsat 8 и «окон прозрачности» атмосферы отображено на Рисунке 7.

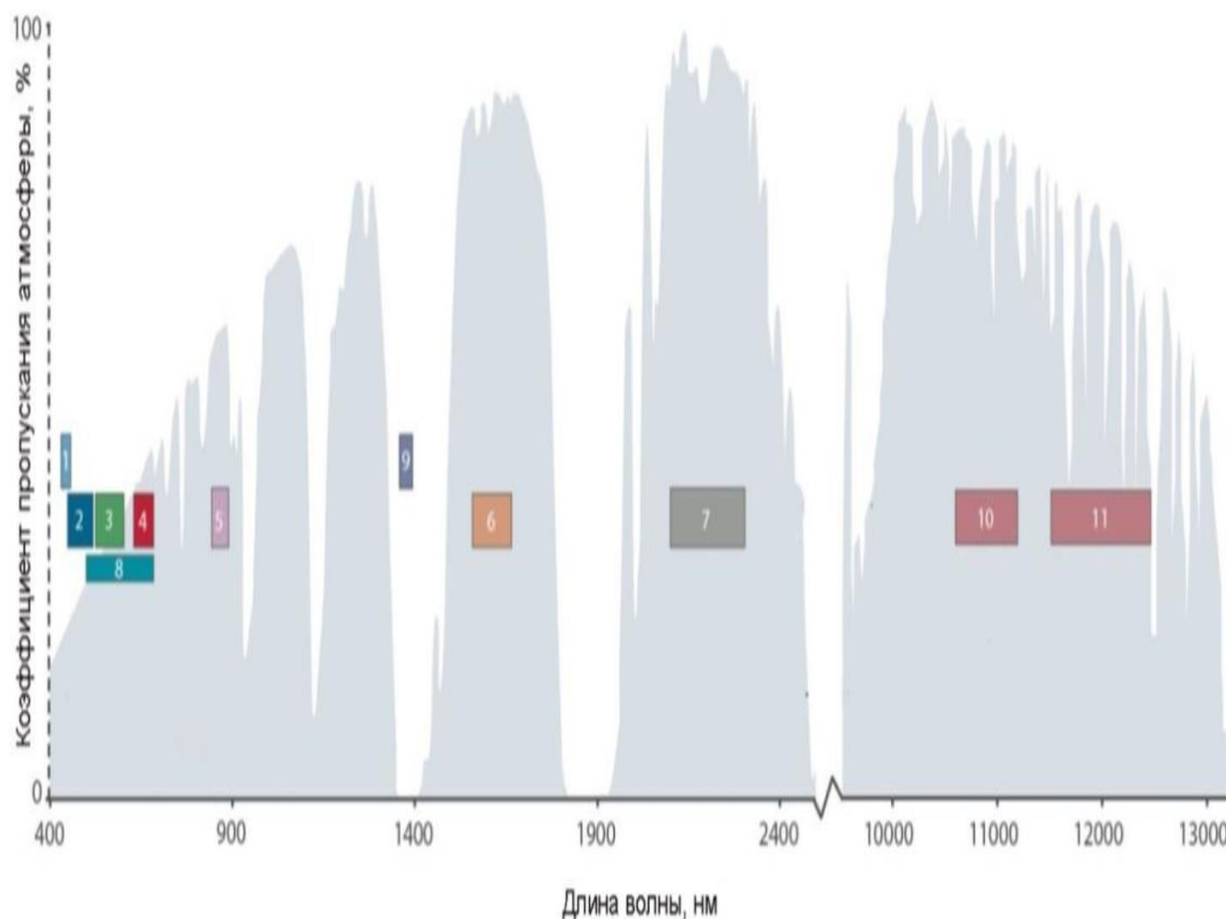


Рис.7 Длины волн спектральных каналов спутника Landsat 8 и «окна прозрачности»

2.4 Описание спектральных каналов съемки

Канал 1 (прибрежный - аэрозольный/Coastal - Aerosol: $\lambda = 0.434-0.453$ мкм) проявляет чувствительность к фиолетовым и темно-синим цветам. Наблюдается успешное рассеивание синего цвета на частичках пыли и воды в воздухе. Канал имеет название аэрозольный или прибрежный, поскольку эти две характеристики описывают два его главных применения: выявление мельчайших частиц пыли и дыма в воздухе, изучение мелководья.

Канал 2 (голубой/Blue: $\lambda = 0.453-0.513$ мкм) чувствительный к атмосферным газам, предназначен для выявления дыма, полезен для изучения береговых водных объектов в гидрографии, подводной растительности, отделения участков, покрытых растительностью, от участков голых почв, определения лиственных и хвойных пород деревьев.

Канал 3 (зелёный/Green: $\lambda = 0.534-0.591$ мкм) используется в целях идентификации жизнеспособных растений и разделения разных классов растительности, чувствителен к мутной воде, помогает в выявлении подводной растительности.

Канал 4 (красный/Red: $\lambda = 0.635-0.672$ мкм) предназначается для распознавания разных типов растений, потому как он чувствителен в зоне существенного поглощения хлорофилла.

Канал 5 (ближний инфракрасный/NIR: $\lambda = 0.852-0.878$ мкм) более всего чувствительный к разным породам состава растительного покрова, предназначается для определения природного разнообразия растений, оценки процента активной биомассы и уровня здоровья растений, обнаружения влажных и сухих почв. Канал NIR является одним из самых информативных, для изучения характерных лесных насаждений [3].

Канал 6 (1-ый коротковолновый инфракрасный/SWIR-1: $\lambda = 1.565-1.652$ мкм) а также Канал7 (2-ой коротковолновый инфракрасный/SWIR-2: $\lambda = 2.106-2.295$ мкм), происходит захват участков спектра, наиболее эффективных для изучения растительного покрова [4]. Данные каналы проявляют чувствительность к наличию и колебаний влаги в растительных покровах, используются в оценке состояний растительности. Каналы также помогают в выявлении горных пород и почв, поскольку канал обладает особенной чувствительностью к содержанию трёхвалентного железа в горных породах.

Канал 8 (панхроматический: $\lambda = 0.502-0.66$ мкм) содержит в себе преимущества 2-ого, 3-его и 4-ого канала, занимает видимую часть спектра, особенно важную в изучении растительного покрова, сельскохозяйственных угодий, лесных насаждений и болотных участков. Обладает высоким пространственным разрешением в 15 метров. Это обусловлено присутствием панхроматической аппаратуры, регистрирующей большое количество излучения. Может обеспечить высокое соотношение сигнал/шум [5].

Канал 9 (перистый облака/Cirrus: $\lambda = 1.362-1.385$ мкм) предназначается в изучении облаков, поверхность земли в нём трудно различима, так как он в значительной степени поглощается атмосферой.

Каналы 10-ый и 11-ый - тепловые каналы ($\lambda = 10.61-11.18$ мкм и $11.51-12.52$ мкм) применяются в измерении температуры поверхности, используются в анализе влажности почв, обнаружении бытового скопления тепла, теплового загрязнения вод, геотермальных вод, обнаружении пожаров.

2.5 Обработка космических снимков

Развитие научно-технического прогресса в отрасли было продиктовано необходимостью обработки и передачи большого объема геопространственных данных. Это связано как с ростом объема информации, необходимого для проведения исследований в науке, так и с необходимостью обеспечения нужд народного хозяйства [6]. В процессе развития компьютерной техники появилась возможность разрабатывать методы автоматизации дешифрирования разных объектов природы с помощью космических изображений.

Обработка многозональных снимков базируется на анализе значений вектора спектральных яркостей изображений. Автоматизация методик обработки данных ДЗЗ – многоступенчатый, трудоёмкий процесс. Дешифрирование космических изображений всегда имеет конечную цель. [7]. Для решения различных по сути задач, применяются разные технологии и методы обработки информации ДЗЗ. Многие действия могут быть успешно автоматизированы при условии использовании определённого порядка действий при обработке изображений [8].

Первый этап - данные спутникового зондирования принимаются наземными пунктами приёма сигнала, проходят начальную обработку, которая состоит в расшифровке радиосигналов, разделении рабочей и служебной информации, распределение сигналов по каналам и сенсорам, формирование сцены.

Из всех последующих методов обработки информации следует выделить две группы: начальная обработка снимков и классификация объектов. Начальная обработка снимков включает проведение преобразований, которые направлены на повышение качества изображений, приведение их к виду, максимально оптимальному для дальнейшего тематического дешифрирования.

Главными составляющими предварительной обработки снимков являются - геометрическая и радиометрическая коррекции, а также операции для повышения качества изображений.

Изначально изображения поступают на приемную аппаратуру в виде чисел, (DN - Digital Numbers), которые не имеют физического смысла. Они связаны со значениями спектральных коэффициентов яркости, индивидуальными для разных датчиков.

Проведение радиометрической калибровки начального уровня необходимо для перевода пикселей в показатели характеристик отраженного излучения. К примеру, для снимков, поступивших со спутника Landsat 8, этот пересчет проводится по формуле [2.1.1]:

$$r\lambda = M_p \times DN + A_p \quad (2.1.1)$$

где:

A_p – калибровочное смещение;

DN - исходные цифровые значения;

$r\lambda$ – коэффициент яркости спектра;

M_p – калибровочное усиление.

К действиям способным улучшить изображения относят такие процедуры, которые допускается поделить на две большие группы: спектральные и пространственные[10].

Преобразования спектральных значений проводятся с учётом особенностей пиксельных значений в рамках всех зоны спектра. В основе методов спектрального преобразования стоит преобразование и анализ гистограмм распределений яркости – функции распределения яркости в радиометрических диапазонах, отображение на графиках количества пикселей с известным значением спектральной яркости.

Преобразование пространственных значений производится для выявления на снимке отдельных структур зависящих от их пространственной частоты. Пространственные преобразования базируются на изменении яркостных показателей пикселей в сравнении с анализом ближайшей к ним окрестности [11].

Визуальные наблюдения говорят о том что, неоднородные территории с резкими изменениями значений яркости относятся к высокой пространственной частоте, а однородные области соответствуют низкой пространственной частоте. Пространственная фильтрация относится к локальным методам, изменяющим показатели значений пикселей в наборе согласно значениям соседних пикселей. Основные типы фильтрации можно поделить на две группы:

- низкочастотная фильтрация, устраняющая резкие изменения яркости, сглаживает шумы;
- высокочастотная фильтрация, направленная на повышение резкости, выделение деталей, подчеркивания линейных объектов, границ, повышение детализации.

К широкомасштабным пространственным преобразованиям могут относиться различные виды Фурье-фильтрации, включающие в анализ всё изображение либо большую часть снимка. Фурье - преобразование используется с целью удаления шумов, полосчатости а также вибраций изображений, посредством нахождения периодов их появления.

Процесс квантования также относят к видам пространственного преобразования, непрерывный полутоновый снимок заменяется дискретным, у которого яркость поделена на несколько ступеней. 8-битовое изображение обладает 256 уровнями яркости и воспринимается глазом как непрерывное. При применении к квантованным изображениям окрашивания, выполняется преобразование – цветокодирование.

Автоматизированная система классификации изображений реализует алгоритмы двух типов: алгоритмы подконтрольного и неконтролируемого классифицирования, когда классы объектов имеют связь с объектами поверхности земли.

Контролируемая система классификации (обучаемая классификация) основана на анализе определенных дешифровщиком заранее, значений эталонной спектральной яркости различных объектов. Задача обучения заключается в поиске пикселей, представляющих участки эталонного распознавания типа земных объектов на поверхности. С целью грамотной идентификации эталонных пикселей используются данные вспомогательных материалов полевых обследований, изображения более качественного пространственного разрешения, топографические карты.

Выбор эталонных пикселей формирует обучающие выборки. В качестве достоверности классификаций, каждому типу среди всех признаков должна соответствовать своя область значений яркости, которая не пересекается с областями других классов. В пространстве признаков, репрезентативная выборка описывается одномодальной гистограммой распространения яркости, минимальной дисперсией и небольшими значениями отклонений от средних значений. По завершении создания и анализа обучающих выборок, пиксели снимков сортируются по классам, основываясь на решающем правиле классификации. Вектор характеристик всех пикселей приводится в сравнение, с сигнатурами исходя из решающего правила.

Классификатор выполняет задачи по — отождествлению всех векторных характеристик как принадлежащих к классу, соответствующему промежутку решений, в который он попадает. Общеизвестно два пути в разработки правил и классификаций: детерминированный и статистический.

Детерминированный подход обычно применим, в случае если классы объектов не имеют пересечений в пространстве признаков, а области решений выделяются линейными границами, которые могут определяться линейными разделяющими функциями. Основными методами детерминированного подхода являются: минимальных расстояний, параллелепипеда. Статистические методы применяются, когда присутствует неопределенность относительно правильного обнаружения обучающих образов, при совпадении образов исследуемых классов на пространствах признаков. Статистическая обработка позволит уменьшать негативное влияние факторов, перечисленных выше на точность классификации. Главным способом статистического подхода выступает метод максимальных правдоподобий.

В методе параллелепипедов используется самый простой алгоритм классификации небольшого количества четко различимых классов объектов. Граничные значения параллелепипедов вычисляются по разбросу эталонных значений с различными значениями интервалов яркости по каждой координате. Пиксельные сигнатуры принадлежат к определенному классу согласно правилу.

Методика минимальных расстояний используется при подобных спектральных признаках у различных видов снимков в перекрывающихся диапазонах значений яркости классов. Метод основывается на вычислении значения средних яркостей класса по обучающей выборке.

2.6 Атмосферная коррекция данных ДЗЗ в оптическом диапазоне

Распространенной формой дистанционного зондирования - является измерения спутниковой приемной аппаратурой значений интенсивности солнечного излучения, отраженного от земной поверхности. На рисунке 8 представлено распределение уровня спектральной плотности и энергетической освещенности на верхних и нижних границах атмосферы. Из рисунка следует, максимальные значения расположились в видимых диапазонах длин волн ($\lambda=0,4-0,8$ мкм).

Понижение интенсивности солнечного излучения после прохождения атмосферы связано с процессами поглощения и рассеивания такими компонентами как: (атмосферные газы, аэрозоли, водяной пар) даже в условиях отсутствия облачности. В случаях измерения физических характеристик земной поверхности при помощи данных ДЗЗ, появляется необходимость осуществления коррекции атмосферных влияний.

Прохождение по пути «Солнце – земная поверхность – сенсор» сопряжено с прохождением участков, где происходят поглощения газами и рассеяние частицами аэрозолей и молекулами газов. Газами, наиболее сильно поглощающими солнечное излучение, являются: метан (CH_4), углекислый газ (CO_2), водяной пар (H_2O), кислород (O_2), озон (O_3) и оксид азота (N_2O). Выборка промежутков, длин волн в спектральных каналах сенсоров позволяет существенным образом понизить влияние процессов поглощения.

Аэрозоли представляют собой дисперсную систему, состоящую из распределенных в атмосфере мельчайших частиц. По виду источников выделяют: естественные (извержения вулканов, песок и частицы почвы, дым от пожаров) и антропогенные (производственные и бытовые выбросы в атмосферу) источники аэрозолей.

Исходя из распределения по высоте, выделяют стратосферные и тропосферные аэрозоли. Стратосферные аэрозоли возникают в результате извержений вулканов, обладают существенной оптической толщиной, простираются над значительными территориями и сохраняются в атмосфере в течение времени от нескольких месяцев до нескольких лет. Основная масса аэрозолей распространена в тропосферном слое. Состав аэрозолей разнообразен и включает в себя как песок пустынь, так и частицы почвенной эрозии, продукты промышленных выбросов, выделения в результате горения биомасс и так далее. Состав тропосферных аэрозолей изменчив как в пространстве, так и во времени.

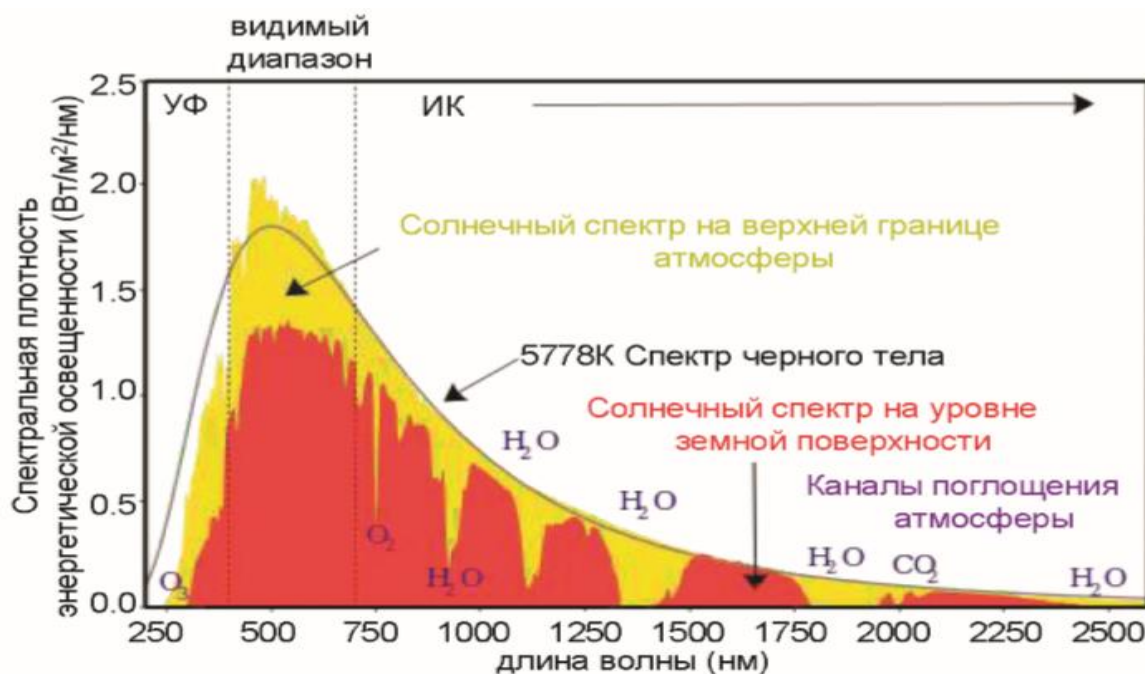


Рис. 8 Спектральные значения излучения солнца на нижних (красным цветом) и верхних (желтым цветом) границах атмосферы.

Понижение уровня влияния облаков осуществляется при помощи построения композитных изображений основанных на процедуре максимизации показателей NDVI в избранный интервал времени. Позднее в наборах данных PAL и GIMMS начали вести учет влияний молекулярных рассеиваний Рэлея, основываясь как на физических моделях, так и на основе статистических методов обработки рядов временных данных.

2.7 Получение коэффициентов спектральной яркости

Для проведения правильного исследования биофизических характеристик растительности на основании данных ДЗЗ, необходимо учитывать модель взаимодействия с солнечным излучением.

Прогнозирование взаимодействий солнечного излучения с растительностью в оптическом диапазоне проводится по двум направлениям, а именно: моделирование отражения от поверхности растительной среды, моделирование объемного рассеяния растительной средой. Каждое из этих направлений представлено рядом моделей, в основе которых, как правило, лежат принципы геометрической оптики для моделирования поверхностного отражения растительным покровом и уравнение переноса для описания рассеяния внутри растительной среды. Наличие двух подходов к моделированию взаимодействия солнечного излучения с растительной средой, пожалуй, отражает наличие корпускулярно-волнового дуализма природы света.

Для количественного описания отражательной способности растительной поверхности используются следующие функции. Пусть мощность светового излучения характеризуется потоком F [Вт]. Тогда плотность потока излучения на единицу площади поверхности A и единицу телесного угла « Ω » характеризуется интенсивностью I [Вт/(м²·ср)]:

$$I = \frac{d^2 F}{dA d\Omega \cos\theta}. \quad (2.7.1)$$

Направление телесного угла « Ω » задано зенитным « θ » и азимутальным « j » углами. Интерпретация физического смысла телесного угла и площади поверхности зависит от типа вычислений:

1) для расчета потоков на излучателе dA – площадь элемента излучателя, а $d\Omega$ – телесный угол, в который проникает энергия излучателя;

2) для расчета потоков на сенсоре dA – площадь элемента сенсора, а $d\Omega$ – раcтвор телесного угла, под которым виден излучатель.

Анизотропия отражательных свойств различных поверхностей измеряется относительно Ламбертовской поверхности – изотропного отражателя, для которого интенсивность отраженного излучения не зависит от направления (рис. 9а).

Для Ламбертовской поверхности выполняется закон косинуса, величина потока, отраженного от Ламбертовской поверхности, пропорциональна косинусу угла между направлением визирования и нормалью к поверхности (рис. 9б).

Оба утверждения (для интенсивности и потока) математически эквивалентны. Физически они выражают тот факт, что хотя интенсивность отраженного излучения изотропна, при пологом визировании площадка видна в меньшем растворе телесного угла и, следовательно, меньшее количество энергии попадает на сенсор.

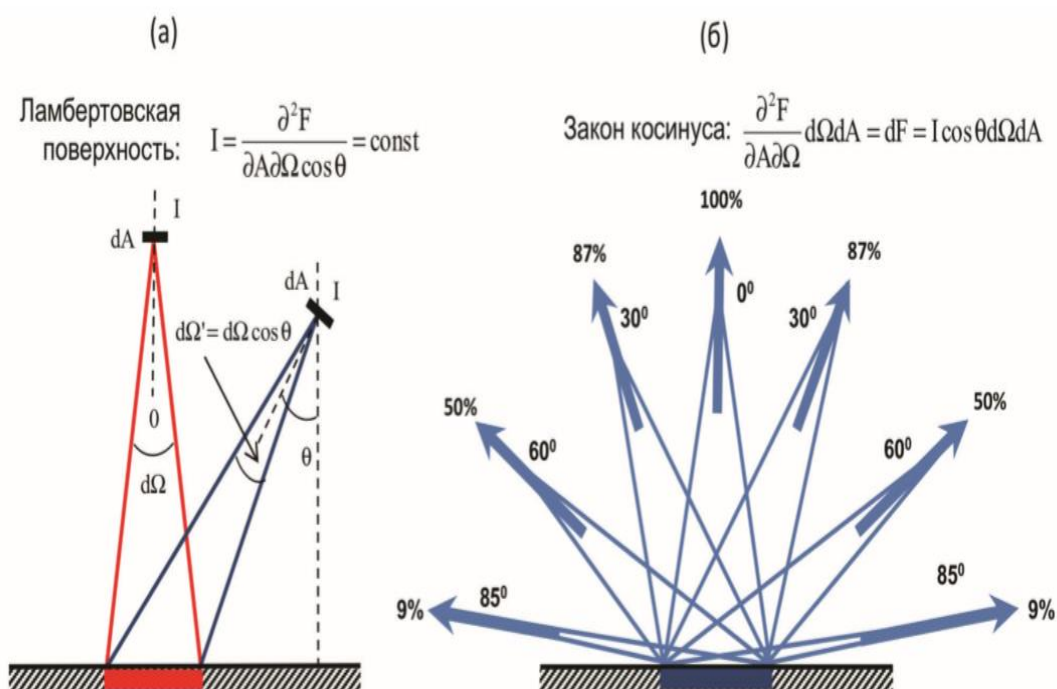


Рис.9 Измерение отраженной энергии от ламбертовской поверхности: (а) и (б) - плотность потока отраженного излучения (закон косинуса Ламберта)

Пусть падающее излучение в направлении (θ_i, ϕ_i) характеризуется интенсивностью I^i , а излучение, отраженное в направлении (θ_v, ϕ_v) имеет интенсивность I^v (θ – зенитный, ϕ – азимутальные углы, характеризующие направление распространения излучения).

Отражательная способность растительного покрова характеризуется двухлучевой функцией спектрального отражения (ДФСО). Она определяется отношением плотности отраженного потока излучения на единицу площади поверхности, к телесному углу в направлении « Ω^v » (θ_v, ϕ_v) к плотности падающего потока в направлении Ω^i (θ_i, ϕ_i).

$$ДФСО(\theta_i, \phi_i, \theta_v, \phi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v} \bigg/ \frac{\partial^2 F^i}{\partial A \partial \Omega^i} = \frac{I^v(\theta_v, \phi_v) \cos \theta_v}{I^i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i}. \quad (2.7.2)$$

Однако чаще используется термин индикатриса отражения (ИО) или коэффициент спектральной яркости (КСЯ), определенный как отношение плотности отраженного от данной поверхности потока излучения на единицу площади поверхности и телесного угла « Ω^v » (θ_v, ϕ_v) к интенсивности излучения, отраженного от ламбертовской поверхности, при тех же условиях освещения и наблюдения.

$$КСЯ(\theta_v, \phi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v} \bigg/ \frac{\partial^2 F_L^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} = \frac{I^v(\theta_v, \phi_v) \cos \theta_v}{(1/\pi) \int_{2\pi} I^i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \quad (2.7.3)$$

Коэффициент спектральной яркости связан с двухлучевой функцией спектрального отражения следующим соотношением:

$$КСЯ(\theta_i, \phi_i, \theta_v, \phi_v) = \frac{(1/2) \int_{2\pi} ДФСО(\theta_i, \phi_i, \theta_v, \phi_v) I^i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}{\int_{2\pi} I^i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \quad (2.7.4)$$

В западной литературе принята иная терминология описания отражательных свойств поверхности. Двухлучевая функция распределения отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF [ср⁻¹]) определена как отношение интенсивности отраженного излучения в направлении «Ω^v» (θ_v, φ_v) к плотности падающего потока на единицу площади:

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} \bigg/ \frac{\partial F^i}{\partial A} = \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v)}{\int_{2\pi} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i} \quad (2.7.5)$$

Обзор подходов к моделированию коэффициента спектральной яркости показывает, что довольно часто для этих целей используются относительно простые модели, основанные не строго на физических законах, а на полуэмпирически подобранных функциональных зависимостях, выражающих свойства наблюдаемой земной поверхности. На рисунке 11 показано влияние 3D структуры растительности на КСЯ. Кроны деревьев бросают тень на подстилающую поверхность и соседние деревья. При совпадении направлений наблюдения, тени исчезают и освещенность достигает максимума (слева). Это явление называется эффектом обратного блеска.



Рис. 10 Влияние 3D структуры растительности на КСЯ. Кроны деревьев бросают тень на подстилающую поверхность и соседние деревья.

2.8 Вегетационные индексы растительности

Прокси-величинами для биофизических параметров могут служить т.н. вегетационные индексы – арифметические комбинации значений КСЯ в отдельных спектральных каналах. Эти выражения выводятся на основе эмпирических наблюдений и преследуют цель увеличения информативности сигнала в отдельных каналах для исследований растительности при одновременном снижении влияния побочных факторов (влияние атмосферы, яркости почвы, эффекта насыщения, зависимости от геометрии наблюдений и т.п.).

Важно отметить, что вегетационные индексы не являются биофизическими параметрами, они так же как и КСЯ остаются радиометрическими величинами. Для построения вегетационных индексов в основном используются КСЯ в видимой и инфракрасной областях спектра, т.к. отраженное излучение на этих длинах волн позволяет характеризовать общее состояние растительности, содержание в зелёной массе хлорофилла, азота, влаги. Например, интервал между красной и ближней ИК областями спектра, называемый «красным краем», чувствителен к концентрации хлорофилла в листьях. ИК область используется для оценки количества влаги в растительных компонентах. Измерения отражательной способности происходят в интервале длин волн $\lambda=1,65\text{--}1,85$ мкм и информативны при оценке дефицита влаги в листьях. По поведению изовегетационных линий в спектральном пространстве вегетационные индексы делят на индексы отношения и перпендикулярные индексы.

Использование дробного индекса «RVI» производится для оценки листового покрытия лесной растительности. Индекс рассчитывался как отношение коэффициента пропускания лесным пологом излучения с длиной волны $\lambda=0,8$ мкм τ (NIR) к коэффициенту пропускания излучения на $\lambda=0,675$ мкм τ (Red):

$$RVI = \frac{\tau(NIR)}{\tau(Red)}. \quad (2.8.1)$$

Однако дистанционными методами коэффициент пропускания напрямую измерить невозможно, и в настоящее время под дробным индексом понимается выражение указанного вида, аргументами которого чаще всего являются КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах, $\rho(Red)$ и $\rho(NIR)$. Этот индекс называется «SR» (Simple Ratio). Разностные вегетационные индексы представляют собой разность между измерениями КСЯ в двух различных каналах. Например, «DVI» (Difference Vegetation Index) в виде разности КСЯ в ближнем ИК и красном диапазонах:

$$DVI = \rho(NIR) - \rho(Red). \quad (2.8.2)$$

Значения DVI являются показателем состояния растительности, однако индекс подвержен влиянию атмосферы и геометрии измерений и поэтому без надлежащей атмосферной коррекции может использоваться только локально как во времени, так и в пространстве. На основе синтеза дробного и разностного индексов был выведен индекс «NDVI» (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red)} \quad (2.8.3)$$

В то же время наличие измерений КСЯ в каждом из каналов в числителе и знаменателе позволяет существенно уменьшить влияние атмосферы и геометрии наблюдений и проводить более корректное сравнение измерений, сделанных в разное время, чем, например, в случае разностного индекса. Благодаря перечисленным достоинствам, «NDVI» является одним из наиболее популярных вегетационных индексов и активно используется для широкого круга задач, связанных с дистанционным мониторингом растительности.

На рис.11 представлено глобальное распределение индекса «NDVI», полученное по данным 16-дневного композитного продукта Aqua MODIS (MYD13A2) версии 5 разрешением 1 км за период 20 августа – 4 сентября 2016 г.

Из приведенного изображения следует, что индекс имеет высокую чувствительность к плотности растительного покрова – возникает высокий контраст между плотным и разреженным растительным покровом. Однако индекс резко выходит на насыщение и теряет чувствительность (Амазония, Центральная Африка, Океания).

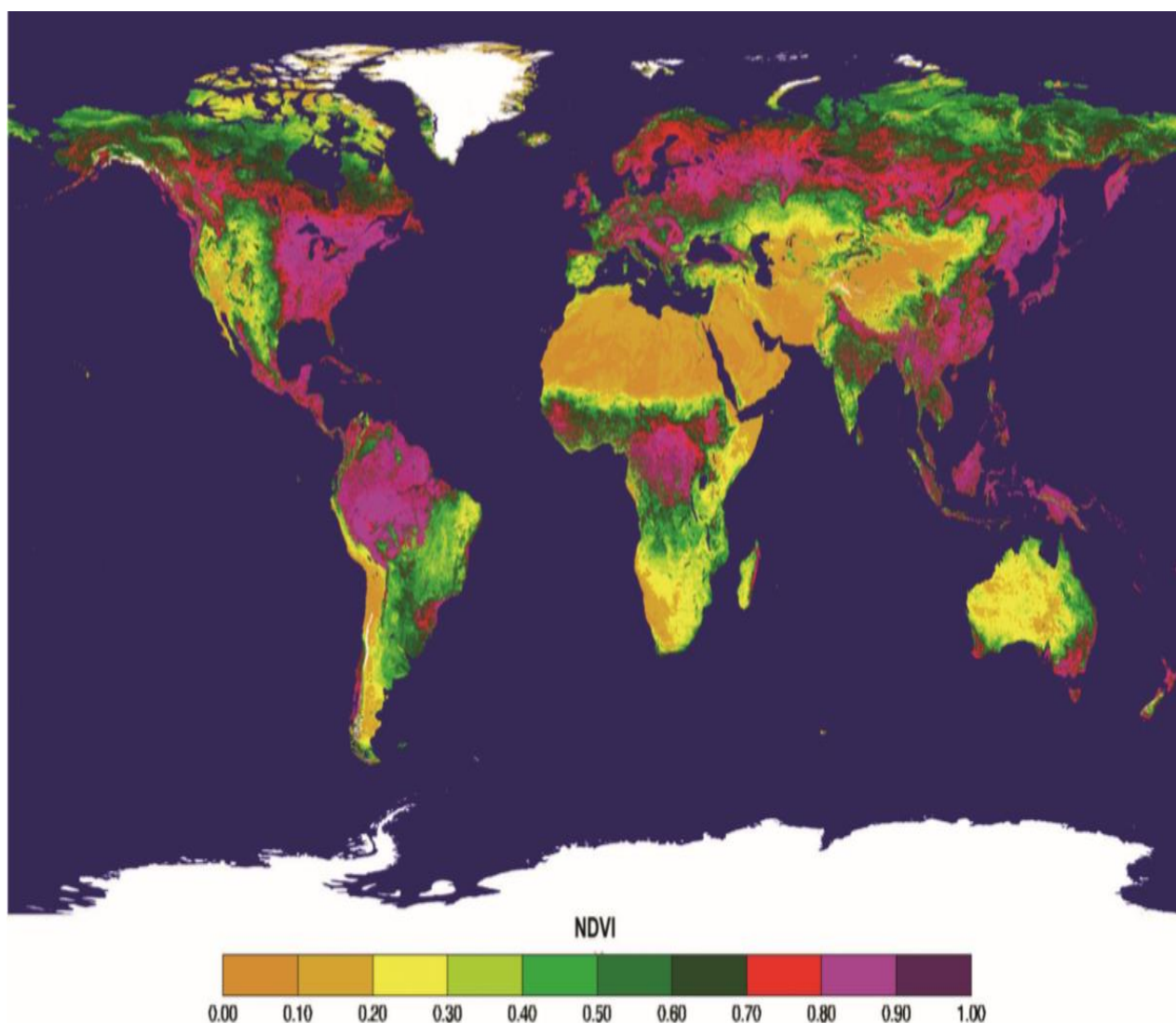


Рис. 11. NDVI по данным Aqua/MODIS (версия 5) (16-дневный композит для 20 августа – 4 сентября 2016), географическая проекция.

Для повышения чувствительности «NDVI» при высокой концентрации хлорофилла было предложено использовать нормировочный коэффициент перед значением КСЯ в ближнем ИК канале в выражении для «NDVI». Полученный индекс был назван «WDRVI» (Wide Dynamic Range Vegetation Index):

$$WDRVI = \frac{k\rho(NIR) - \rho(Red)}{k\rho(NIR) + \rho(Red)} \quad (2.8.4).$$

Где: $0 < k \leq 1$ – нормировочный коэффициент. Выбор значения параметра «k» зависит от сенсора и атмосферных условий; при $k=1$ формула для индекса приводит к «NDVI», а в случае насыщения, когда $\rho(NIR) \gg \rho(Red)$, коэффициент «k» должен быть существенно меньше единицы, для того чтобы КСЯ в каналах стали сравнимы.

Наиболее популярные вегетационные индексы «NDVI» и «RVI» чувствительны не только к параметрам растительности, но и характеристикам почвы, влияние которой может быть велико для разреженной растительности. С учетом этой проблемы была разработана группа вегетационных индексов, имеющих целью измерение количества биомассы независимо от типа подстилающей поверхности – «PVI, SAVI, TSAVI и MSAVI».

В основе концепции индекса «PVI» (Perpendicular Vegetation Index) и некоторых других почвенно-адаптивных индексов лежит экспериментально установленный факт: распределение значений КСЯ для открытой почвы в пространстве измерений в красном и ближнем ИК каналах может быть аппроксимировано прямой линией, называемой линией почв. Линия почв делит плоскость на две части, в одной из которых находятся измерения, соответствующие растительности в любой фазе её развития и при любом типе подстилающей поверхности, в другой части находятся измерения, соответствующие водным или сильно увлажненным объектам.

Перпендикулярный вегетационный индекс выступает как евклидова мера отдаленности данной точки в пространстве измерений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах от линии почв (рис. 12):

$$PVI = \rho(NIR) \cos(a) - \rho(Red) \sin(a) - b \cos(a). \quad (2.8.5).$$

Где:

α – угол между линией почв и осью значений КСЯ в красном канале и b – свободный член уравнения линии почв, $\rho(NIR) = \operatorname{tg}(\alpha)\rho(Red) + b$.

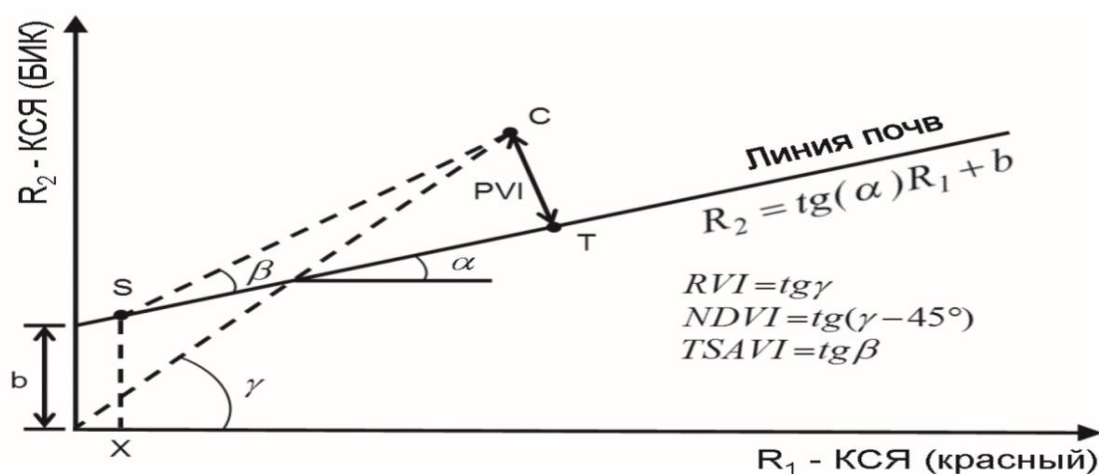


Рис.12 Иллюстрация методов расчёта некоторых вегетационных индексов.

PVI обладает одним полезным свойством: его изовегетационные линии (линии равных значений индекса) параллельны почвенной линии, поэтому соответствующие одинаковому развитию растительности значения PVI являются также одинаковыми для всех яркостей почв вне зависимости от значений КСЯ в каналах. Это позволяет проводить сравнение измерений, сделанных в разных почвенно-климатических зонах, что важно при дистанционном мониторинге растительности в масштабах страны или континента.

Индекс эффективен при наблюдении любой разреженной растительности, в частности, при мониторинге сельскохозяйственных культур, фазы развития которых включают этап всходов на фоне открытой почвы при больших расстояниях между растениями.

Вид «PVI» является обобщенной версией разностного индекса, поэтому на его значения сильно влияет состояние атмосферы, облачность, тени облаков, снежный покров.

На рис. 13 (слева) в пространстве измерений в красном и ближнем ИК спектральных каналах показаны изовегетационные линии «PVI и NDVI» – линии, вдоль которых соответствующие индексы постоянны.

Рассмотрим точку (А) в этом пространстве. Если свойства растительности не изменять, а КСЯ почвы уменьшить (переход от сухой к влажной почве), то можно ожидать, что КСЯ всего покрова изменится вдоль изолинии вегетационного индекса.

Однако возникает противоречие – если следовать изолинии «PVI», то система переместится в точку (С), а если изолинии «NDVI», то в точку (В), это соответствует с экспериментальным данным. КСЯ системы сместится в положение (D) между точками (В) и (С).

Следовательно, изолинии обоих индексов непригодны для описания исключительно растительности, они подвержены влиянию почвы. Для концептуального понимания вклада растительности и почвы в КСЯ всего растительного покрова рассмотрим модельные данные, рассчитанные на основе стохастической модели переноса.

На рис. 13 (справа) показаны изолинии «PVI, NDVI», а также изолиния «LAI», характеризующая искомые изменения КСЯ системы, когда свойства растительности постоянны, а меняются только свойства почвы. Видно, что изолинии «LAI» не совпадают с изолиниями «NDVI и PVI», являются нелинейными и не имеют общего начала. Влияние почвы на вегетационные индексы, изолинии вегетационных индексов PVI и NDVI для хлопка полученные на основе экспериментальных данных (слева, по данным Huete, 1988). Справа дано сопоставление изолиний вегетационных индексов с изолиниями LAI, рассчитанными на основе уравнения переноса.

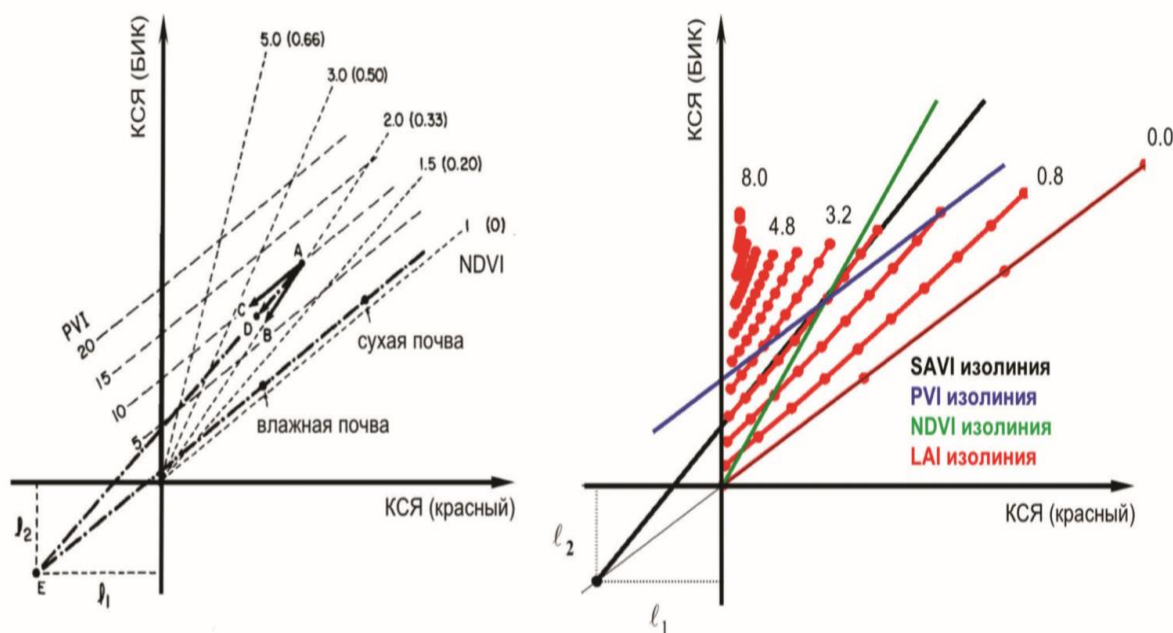


Рис. 13. Влияние почвы на вегетационные индексы.

В работе (Huete, 1988) было предложено аппроксимировать изолинии «LAI» изолиниями «NDVI» со сдвинутым началом координат (ℓ_1 , ℓ_2). Арифметическое преобразование смещения центра координат эффективно сводится к добавлению слагаемого L в знаменателе. Также для сохранения динамического диапазона индекса в интервале $[-1:1]$ необходимо ввести поправочный множитель $(1+L)$ в числитель. Таким образом, был получен индекс SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = (1 + L) \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red) + L} \quad (2.8.6).$$

Как было отмечено ранее, данное выражение является аппроксимацией, в частности, поправочный коэффициент зависит от плотности растительного покрова (LAI, структуры), которые сами являются неизвестными. В работе (Huete, 1988) было показано, что значение $L = 0,5$ является оптимальным для минимизации влияния почвы. В дальнейшем разработанный индекс стал основой для целого семейства параметрических индексов вида «SAVI».

В последствии был разработан итеративный способ расчета коэффициента L , дающий наиболее оптимальное решение задачи минимизации эффекта почвы:

$$L2 = 1 - \frac{2\rho(\text{NIR}) + 1 - \sqrt{[2\rho(\text{NIR}) + 1]^2 - 8[\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})]}}{2} \quad (2.8.7).$$

а индекс типа «SAVI» с приведенными выше параметрами было предложено называть «MSAVI» (Modified SAVI), причем индекс с параметром $L1$ называют «MSAVI1», а с параметром $L2$ – «MSAVI2». Индекс «TSAVI» (Transformed SAVI) из семейства «SAVI» индексов, использующий концепцию линии почв:

$$TSAVI = \frac{a[\rho(\text{NIR}) - a\rho(\text{Red}) - b]}{a\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red}) + ab + X(1 + a^2)} \quad (2.8.8).$$

Где: a и b – коэффициенты линии почв (рис. 13), а X – параметр, компенсирующий влияние почвы.

В случае, когда почвенная линия проходит через начало координат с коэффициентом наклона равным 1, «TSAVI» принимает вид «NDVI». Геометрический смысл индекса – это угол между линией почв и линией, пересекающей линию почв в точке с абсциссой X и проходящей через данную точку C (рис. 13).

Для мониторинга обычной растительности наиболее устойчивым к влиянию почвы является «TSAVI», а в случае разреженной растительности могут быть использованы «MSAVI и SAVI», наиболее чувствительные в области низких значений биомассы. В дальнейшем был предложен более общий подход для коррекции целого ряда эффектов. Целью разработки индекса EVI (Enhanced Vegetation Index), являлось усиление сигнала от растительности в регионах с высокой биомассой, разделение сигнала от растительности и почвы и минимизации остаточного влияния аэрозолей в атмосфере.

Значения EVI определяются следующим образом:

$$EVI = (1 + L) \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + C^1 \rho(Red) - C^2 \rho(Blue) + L} \quad (2.8.9).$$

Параметры определяются индивидуально в зависимости от источника данных. В случае данных MODIS $L = 1$, $C1 = 6$, $C2 = 7,5$. Заметим, что для многих источников данных КСЯ в голубом канале имеет существенные ограничения (сигнал сильно зашумлен атмосферой или данные доступны только в загрубленном разрешении, как в случае MODIS), либо недоступен вообще (для данных AVHRR). Поэтому была разработана упрощенная версия «EVI» (называемая EVI2), которая рассчитывается на основе значений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах:

$$EVI2 = G \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + C\rho(Red) + L} \quad (2.9.0).$$

Путем оптимизации (минимизация разницы EVI и EVI2) были вычислены значения параметров для EVI2: $G = 2,5$, $C = 2,4$, $L = 1$. На рис. 14 показано глобальное распределение EVI, полученное на основе 16-дневного композитного продукта Aqua MODIS (MYD13A2) версии 5 разрешением 1 км за период 20 августа – 4 сентября 2016 г. Сравним его с соответствующим распределением NDVI приведенным выше (рис.11). Хотя пространственные распределения схожи, значения EVI более плавно изменяются с ростом плотности растительного покрова, что позволяет отслеживать вариации в плотной растительной среде (например, Амазония), что невозможно при использовании индекса NDVI. Графики показывают эффективность облачной маски для фильтрации эффекта влияния облаков на NDVI – «хвост» распределения NDVI при низком значении индекса эффективно убирается. Помимо этого маска облаков эффективно фильтрует завышенные значения «NDVI». Это завышение индекса возникает из-за эффекта завышенной оптической толщины аэрозолей вблизи облаков. Ситуация с «EVI» иная – индекс нуждается в фильтрации облаков, но его значения не чувствительны к вышеописанному влиянию аэрозолей.

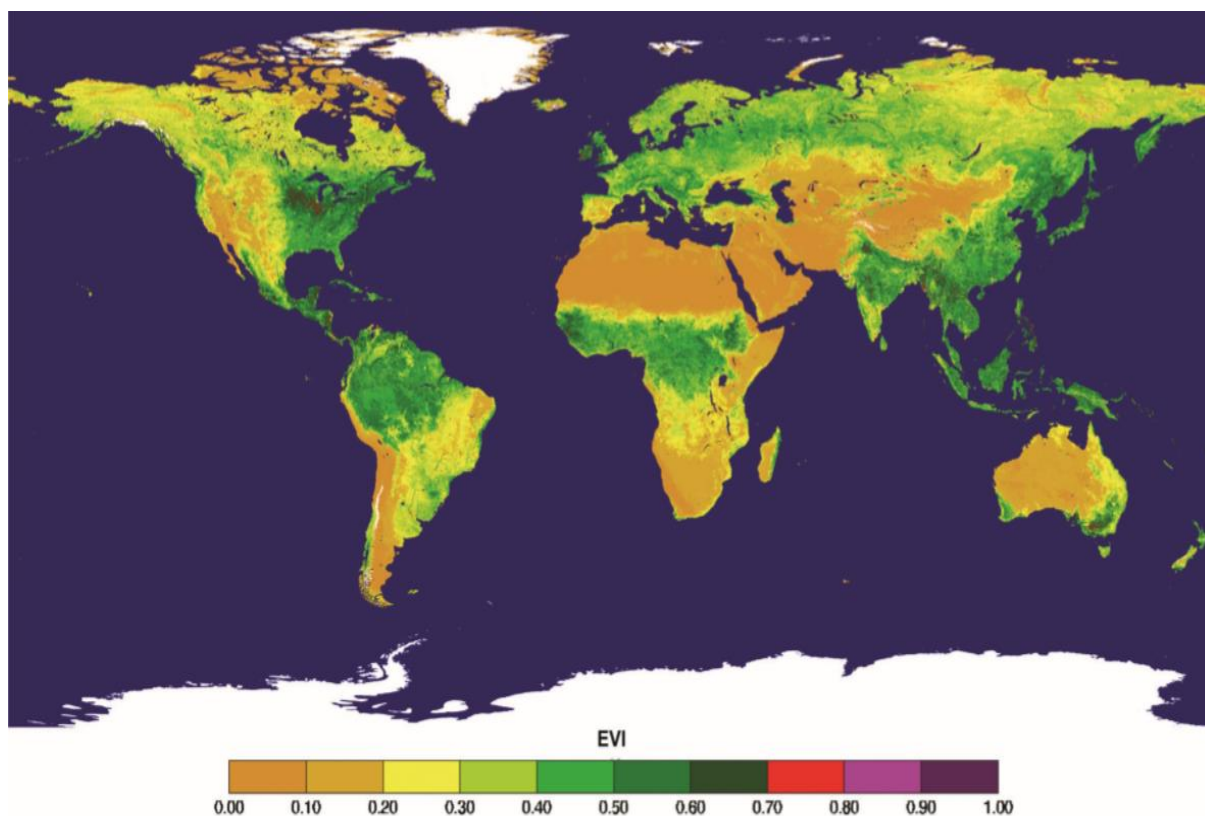


Рис. 14. EVI по данным Aqua/MODIS, версия 5 (16-дневный композит для 20 августа – 4 сентября 2016), географическая проекция.

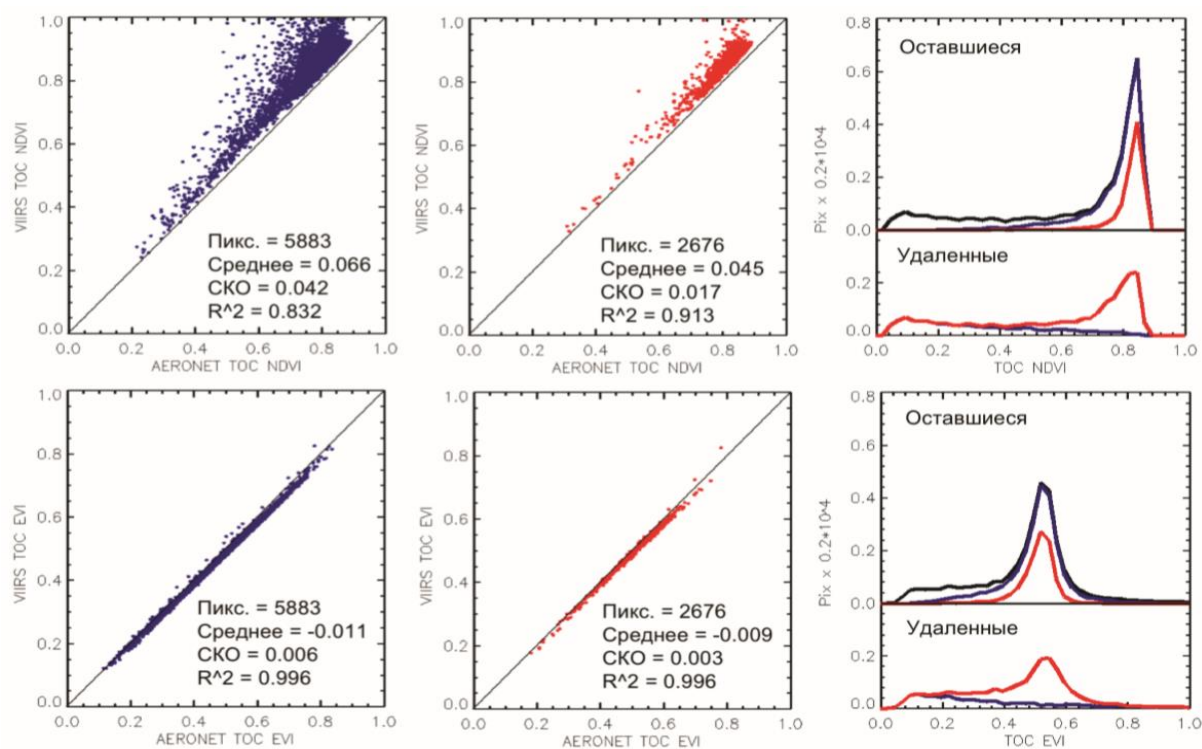


Рис.15 Влияние аэрозолей и облаков на вегетационные индексы NDVI и EVI, рассчитанные по результатам измерений КСЯ на верхней границе растительного покрова.

3. Контрастные изменения в динамике растительности в зависимости от различных климатических воздействий за период 1988-2020гг. в бассейне рек Селенги и Байкала

Селенга́ (бур. Сэлэнгэ мурэн; монг. Сэлэнгэ мөрөн) — крупная река, протекающая на территории Монголии и России (Бурятия). Крупнейшая река, впадающая в Байкал и обеспечивающая до половины ежегодного притока воды в озеро, в том числе около 70 % всего терригенного притока[4]. Средний многолетний сток реки в Байкал составляет порядка 29 км³ воды и около 3 600 000 тонн взвесей, большая часть которых оседает в обширной дельте[5]. Имеет значительный гидроэнергетический потенциал.

Длина — 1024[6] км, 409 км нижнего течения на территории Бурятии в пределах 7 муниципальных районов и города Улан-Удэ.

Площадь бассейна — 447 060 км²[7]. Образуется слиянием рек Идэр и Дэлгэр-Мурен. Имеет преимущественно равнинный облик с чередованием сужений (до 1—2 км) и котловинообразных расширений долины до 20—25 км, где река делится на протоки, образуя многочисленные острова. При впадении в Байкал образует обширную дельту площадью 680 км². На Селенгу приходится примерно 1/2 речных вод, поступающих в озеро Байкал[8].

Водная система Селенга-Байкал представляет собой трансграничный речной бассейн между Монголией и Россией, потепление в этом районе происходит почти вдвое быстрее, чем в среднем мире, в последние десятилетия наблюдался также бурный рост активности человека.

Для того чтобы понять реакцию растительности на изменение климата, динамических пространственно-временных характеристик, взаимосвязи между динамикой растительности и изменчивостью климата территории бассейна Селенга-Байкал было проведено исследование при помощи нормализованного разностного индекса растительности «NDVI».

- К сетке были привязаны данные о температуре и осадках за период с 1982 по 2020 годов.
- Результаты анализа говорят о том, что осадки не сыграли ключевую роль в росте растительности в регионе.
- Общее повышение температуры оказало более существенное влияние на рост растительности, чем осадки. Как правило, наблюдалась тенденция к росту лесной растительности, которая более зависима от температурных показателей, в то время как тенденция снижения была обнаружена для пастбищ, в которых преобладающим фактором, сдерживающим рост, являются осадки.
- Кроме того, человеческая деятельность, такая как: урбанизация, добыча полезных ископаемых, увеличение лесных пожаров, незаконные рубки и выпас скота, также вносят свой вклад в изменения растительности.
- За выбранный период времени средняя глобальная температура поверхности увеличилась, а количество осадков в большинстве среднеширотных и засушливых районах понизилось [1,2].
- Изменение климата оказало значительное влияние на гидрологический цикл путем изменения количества и характеристик распределения глобальных водных ресурсов [3].
- Согласно недавним исследованиям [4–10], изменения в глобальном климате за последнее столетие могут значительно затронуть наземные

экосистемы во всем мире, Евразия особенно сильно подвержена этому явлению [11,12].

- Наблюдается значительно большее повышение температуры, относительно среднемирового, а также имеют место переменные осадки в регионе, бассейна реки Селенга-Байкал[13].
- Поскольку динамика растительности наземных экосистем является важным фактором влияющим на обмен энергией водных и биогеохимический циклов, её понижение представляет собой одну из наиболее важных экологических проблем, связанных с изменением климата [14,15].

Изменения климата влияют на продуктивность растительности, изменяя обмен массой и энергией между атмосферой и растительностью. Это наглядно просматривается через географические различия в росте растительности. Например, небольшая тенденция к росту зелени растительности была обнаружена в восточной части Центральной Азии в период с 1984 по 2013 год, в то время как небольшая тенденция к снижению наблюдалась в западной части [2].

В широком смысле, развитие растительности в первую очередь зависит от трех климатических факторов: это температура, количество осадков и радиация, эти показатели могут объяснить 64% глобального изменения растительности для периода 1982–2008 гг. [16].

Температура является основным ограничивающим фактором в высоких широтах [17], осадки представляют собой доминирующий фактор в

засушливых и полужасушливых регионах, и радиация играет жизненно важную роль в динамике тропических лесов [18–21].

Бассейн рек Селенга-Байкал, характеризуется полужасушливым климатом и как следствие на этой территории наблюдается вдвое большие значения глобального потепления в течении 20-го века [22].

Наряду с этим, большинство регионов по всему бассейну реки показали снижение годового количества осадков в последние десятилетия [23]. Такие изменения климата в этом регионе, вероятно, окажут заметное негативное влияние на динамику растительности.

В последнее время влияние изменения климата на динамику растительности в бассейне реки Селенга-Байкал привлекает все большее внимание со стороны общественности. Ученые и правительства всего мира озабочены защитой самого глубокого и большого пресноводного резервуара на Земле, Озера Байкал, которое было объявлено объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО из-за его уникальных экосистем [25].

Таким образом, это исследование направлено на:

- определение характеристик временных изменений тенденций и пространственных моделей климатических переменных и растительности на территории Селенга-Байкальского бассейна в период с 1982 по 2020 год;
- определение влияний преобладающих климатических факторов, то есть температуры и осадков на рост растительности в различных условиях;
- различение различных реакция пастбищ и лесов на климатические факторы и антропогенные воздействия.

3.1 Материалы и методы

3.2 Область исследования

Селенго - Байкальский бассейн располагается в центральной части Евразийского континента вдоль международной границы между Монголией и Россией и имеет координаты: ($46^{\circ}280-56^{\circ}420E$, $96^{\circ}520-113^{\circ}500N$) (рисунок 17). Общая площадь бассейна $\sim 570\,000\text{ км}^2$, (44,6%) находятся в России и (55,4%) в Монголии [27].

В пределах области исследования расположены два озера. Озеро Ховсгол является крупнейшим пресноводным озером в Монголия по объему и вторым по площади. Байкал - самое большое озеро в мире и содержит 20% от общего мирового запаса пресной воды, иногда может рассматриваться как пресноводное море [27,28]. Реки Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин являются основными притоками озера Байкал.

Озеро Байкал и его водосборный бассейн

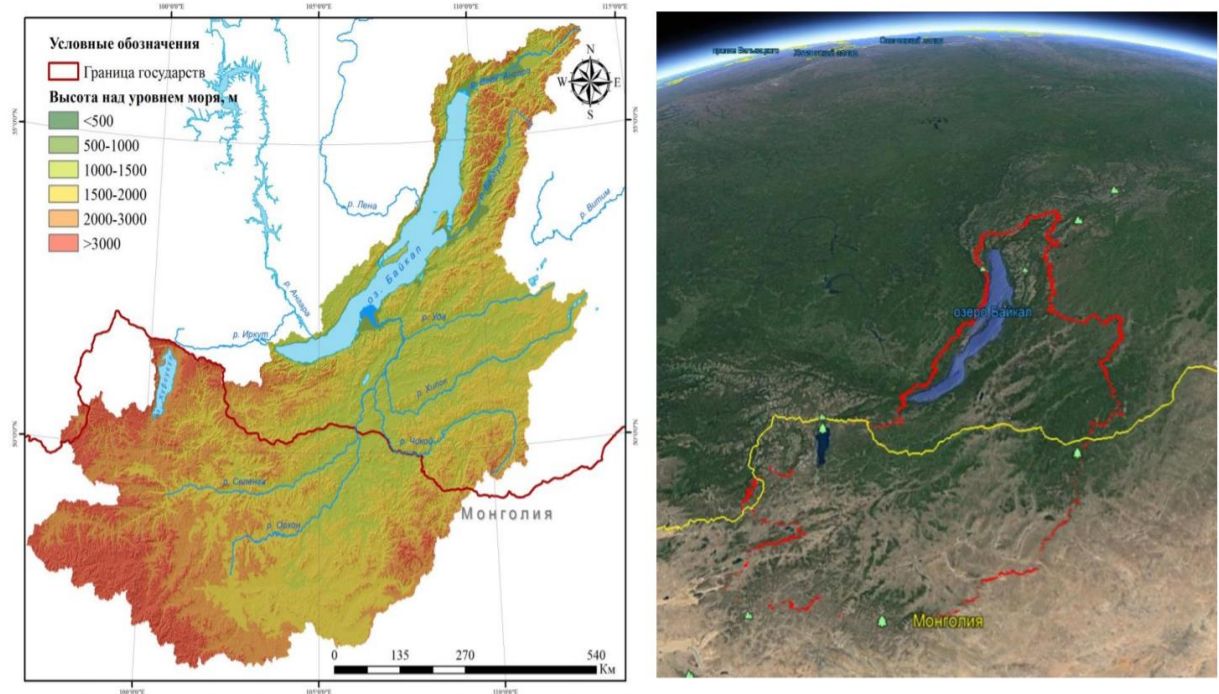


Рисунок 1. Топографическая карта Селенга-Байкальского бассейна.

Селенго - Байкальский бассейн характеризуется чрезвычайно континентальным климатом со значительными годовыми и суточными колебания температуры воздуха и неравномерное сезонное распределение осадков.

Бассейн отличается долгими холодными зимами, в течение которых температура воздуха на Байкале достигают от -37°C до -40°C , и озеро замерзает в течение четырех-пяти месяцев каждый год. Снег обычно выпадает с середины октября до середины апреля, и горы остаются покрытыми снегом примерно до начало апреля [29,30]. Кроме того, летом температура воздуха на короткое время взлетает до 25°C до 30°C так как на территории наблюдается резко континентальный климат [31].

Существенное пространственное изменение осадков наблюдается по всей линии водораздела, и более половины годовых осадков выпадает в течение лета (июнь-август) [28].

Бассейн подвержен воздействию суровых климатических условий, вечная мерзлота на этой территории проистерается от изолированных участков в средней части бассейна участков с непрерывной вечной мерзлотой [2].

Южная часть Селенга-Байкальского бассейна в Монголии в основном покрыта пастбищами и обладает низкой влажностью почвы, а средняя часть бассейна покрыта густой таежной растительностью [32]. Как правило, цветение леса начинается середина мая, иногда в середине июня, и как лугопастбищные угодья, так и леса достигают максимальных значений NDVI в конце июля.

Недавние исследования выявили широко распространенную деградацию монгольской степи, а также примерно 80%-ное снижение NDVI которое можно объяснить увеличением численности скота [34.]

3.3 Климатические данные использованные в работе

Климатические данные (CRU): месячные данные о температуре и осадках (версия TS4.00) в течение периода с 1982 по 2020 год с пространственным разрешением $0,5^{\circ}$ (<http://www.cru.uea.ac.uk>) [35].

Привязываемые к сетке наборы данных были сгенерированы путем интерполяции записей из более чем 4000 метеорологических станции по всему миру, использующие пространственные автокорреляционные функции [36,37].

Данные CRU широко применялись в глобальных климатических исследованиях [21,38,39], а климатические данные CRU были пересчитаны от 0.5° до $0,083^{\circ}$ на основе билинейной интерполяции в соответствии с Глобальным мониторингом запасов и Системы моделирования (GIMMS) 3g NDVI данных.

3.4 Данные о земном покрове

В исследовании используется 30-метровый набор данных Global Land Cover (GLC) (GlobeLand30), полученный из Китайского картографического сервиса GLC (www.globeland30.org), который предоставляет данные GLC в пространственном разрешении 30 м в 2000 и 2010 годах [40].

В классификации GlobeLand30 использовались мультиспектральные изображения американского спутника земельных ресурсов (Landsat) TM5/ETM + экологическая служба в Китае Спутник смягчения (HJ-1) [41]. Общая точность классификации GlobeLand30 составила 83,5%, а Продукты широко использовались для изучения экологических изменений, управления земельными ресурсами.

3.5 Данные NDVI

В представленной работе используется набор данных GIMMS 3g NDVI, полученный с помощью (Advanced Very High Resolution) Радиометр (AVHRR) данные подверглись последующей обработке и архивации.

Представленные данные составляют самый длинный доступный набор данных NDVI за 1982–2020 гг. с пространственным и временным разрешением $0,083^\circ$ и 15 дней соответственно. GIMMS 3g NDVI данные широко используются для мониторинга динамики растительности в глобальном и континентальном масштабах [44–49]. 15-дневные данные были преобразованы в месячные данные для сопоставления климатических данных CRU с помощью метода составного максимального значения (MVC), который помогает в значительной степени устранять атмосферный шум [50]. В представленном исследовании значения NDVI были проанализированы в течение вегетационных периодов с мая по сентябрь по данным Лаврентьевой и соавт. [52].

3.6 Тейл-Сен Анализ медианных трендов

В работе реализован анализ медианного тренда Тейла-Сена в сочетании с тестом Манна-Кендалла для выявления тенденций в больших наборах данных временных рядов. Эта комбинация была использована для анализа ряда данных о климате и растительности в течение длительного времени [2,53,54]. Поскольку ненормальные значения имеют меньшее влияние, анализ медианных трендов методом Тейла-Сена подходит лучше, чем линейная регрессия [55–57], вычислительная формула выглядит следующим образом:

$$S = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad i < j \quad (3.5.1)$$

где S - срединный наклон Тейла-Сена;

Медиана - это медиана набора значений данных;

i и j представляют года; и x_i и x_j - значения года i и j соответственно.

3.7 Тест Манна – Кендалла

Тест тренда Манна – Кендалла [58, 59] - это непараметрический статистический тест, используемый для оценки значимости воздействия климата на изменение растительности [60], и он широко применяется анализа тенденций в изменениях гидрологических и метеорологических временных рядов, а также в исследовании длинных метеорологических и вегетационных временных рядов [61]. Преимущество этого метода в том, что образцы не должны следовать определенному распределению и свободны от помех[58]. Уровень значимости 0,05 указывает на статистически значимое изменение, если $|Z| > 1,96$.

В сочетании с анализом медианного тренда Тейла-Сена и тестом Манна-Кендалла в работе были разделены исследованные области в улучшенные ($S > 0$) и ухудшенные области ($S < 0$) и дополнительно определили, будут ли изменения значимыми ($Z \geq 1,96$ или $Z \leq -1,96$) или нет ($-1,96 < Z < 1,96$).

3.8 Частичный корреляционный анализ

Коэффициент частичной корреляции используется для изучения корреляции между независимой переменной и зависимой переменной, исключая влияние других независимых переменных [62]. В исследовании, зависимой переменной является NDVI, а независимыми переменными являются температура и атмосферные осадки. Был использован коэффициент частичной корреляции, чтобы исследовать корреляцию между NDVI и одиночные метеорологическими переменными. Коэффициент частичной корреляции рассчитывается следующим образом:

$$r_{x_1y \cdot x_2} = \frac{r_{x_1y} - r_{x_1x_2} r_{x_2y}}{\sqrt{(1 - r_{x_1x_2}^2)(1 - r_{x_2y}^2)}} \quad (3.7.1)$$

где:

$r_{x_1y \cdot x_2}$ - коэффициент частичной корреляции переменных x_1 и y , исключая влияние переменных x_2 и $r_{x_1x_2}$;

r_{x_1y} , r_{x_2y} - коэффициенты корреляции Пирсона между переменными x_1 и x_2 , x_1 и y , и x_2 и y соответственно.

Двусторонний критерий Стьюдента использовался для оценки значимости частичных корреляций, и $p < 0,05$ считается значимым.

3.9 Результаты

3.9.1 Метеорологическая характеристика

Пространственные закономерности температуры воздуха и осадков представлены на рисунке 2, температура воздуха и количество осадков в районе Селенга-Байкальского бассейна сильно пространственно неоднородны. Среднегодовая температура воздуха в большей части региона ниже 0°C и колеблется от $-10,50^{\circ}\text{C}$ до $1,44^{\circ}\text{C}$. Области с относительно низкой температурой воздуха в основном расположены на Юго-Западе и Северо-Востоке бассейна. Как правило, температура воздуха увеличивается от высокой к низкой высоте, а также от высоких до средних широт. Поэтому пространственная структура годового распределения температуры воздуха в бассейне в основном вызвана совокупным воздействием высоты и широты.

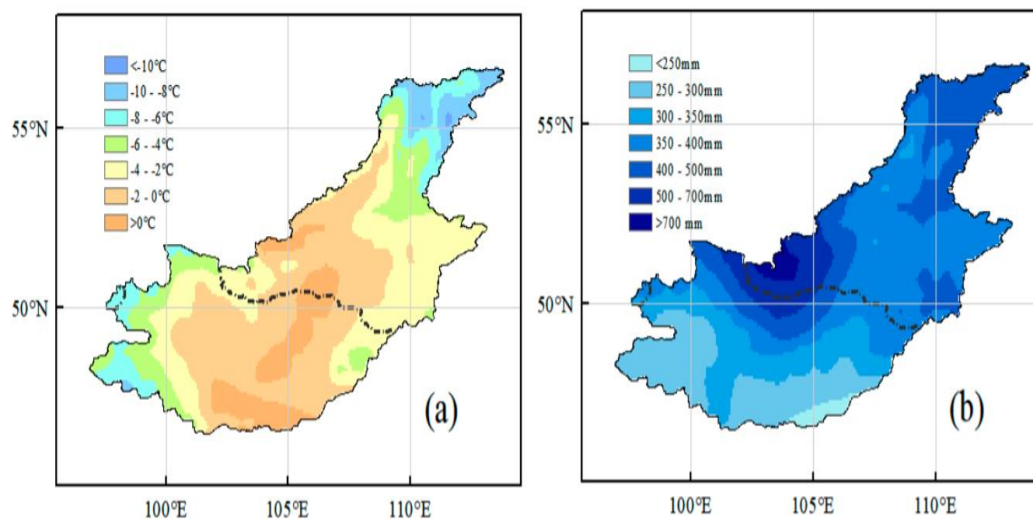


Рис. 18 Пространственное распределение среднегодовой температуры (а) и осадков (б)

с 1982 года до 2020гг.

- Большая часть бассейна расположена в полупустынной зоне, а годовое количество осадков составляет 383,9 мм.
- Среднегодовое количество осадков на юге бассейна очень ограничено и колеблется от 200 до 300 мм, тогда как в межгорных впадинах рек Уда и Селенга может достигать 300–400 мм.
- По бассейну реки Верхняя Ангара и Баргузинского бассейна, среднегодовое значение осадков около 400–450 мм.
- Максимальное количество осадков выпадает над северозападными склонами горных хребтов, которые связывают озеро Байкал и преимущественно обращены к преобладающим воздушным потокам.
- В целом, сильно неравномерное распределение осадков во многом зависит от расположения гор, которые сильно влияют на распределение влажности и количество осадков, контролируя влагоносные потоки воздуха [63].

3.9.2 Временные колебания температуры воздуха и осадков

На рисунках 19 и 20 показано пространственное распределение годовых и сезонных тенденций изменения средней температуры воздуха и общее количество осадков с 1982 по 2020 год соответственно. Как показано на рисунке 18, температура воздуха увеличилась за последние три десятилетия во всех регионах и 51,82% региона проходит тест на значимость ($p < 0,05$).

В целом, тенденция потепления становится все более очевидной по направлению с Северо-Востока на Юго-Запад.

Тенденции изменения температуры воздуха демонстрируют различные закономерности среди сезонов, как показано на рисунке 20, и значительную тенденцию к росту можно наблюдать весной и летом.

Зимняя температура, напротив, снизилась в период 1982–2020 гг., Что согласуется с недавними исследованиями, например, [23,64,65]. Тем не менее, снижение зимней температуры в бассейне реки Селенга-Байкал не проходит тест значимости на уровне 0,05.

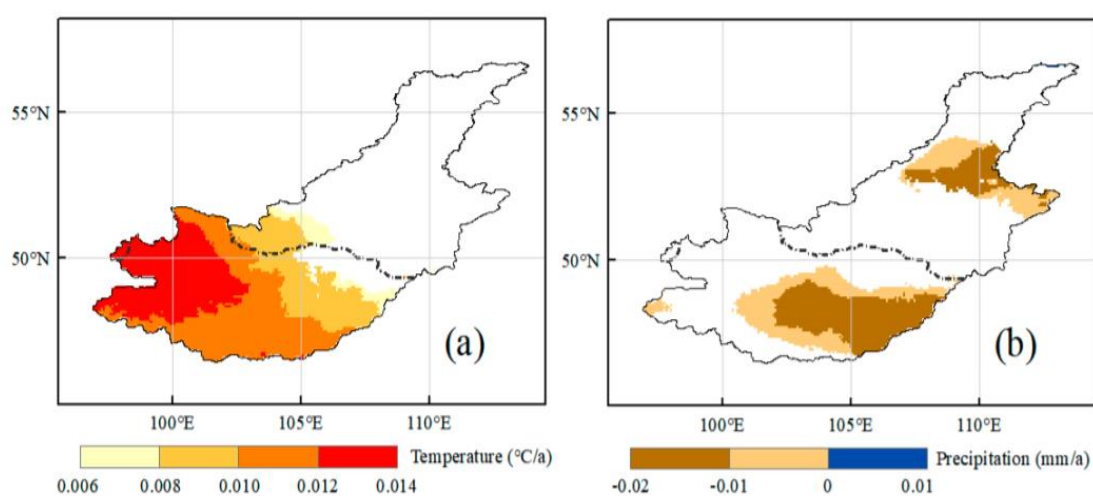


Рис. 19 осадки (б) над Селенга-Байкальским бассейном с 1982 по 2020 год.

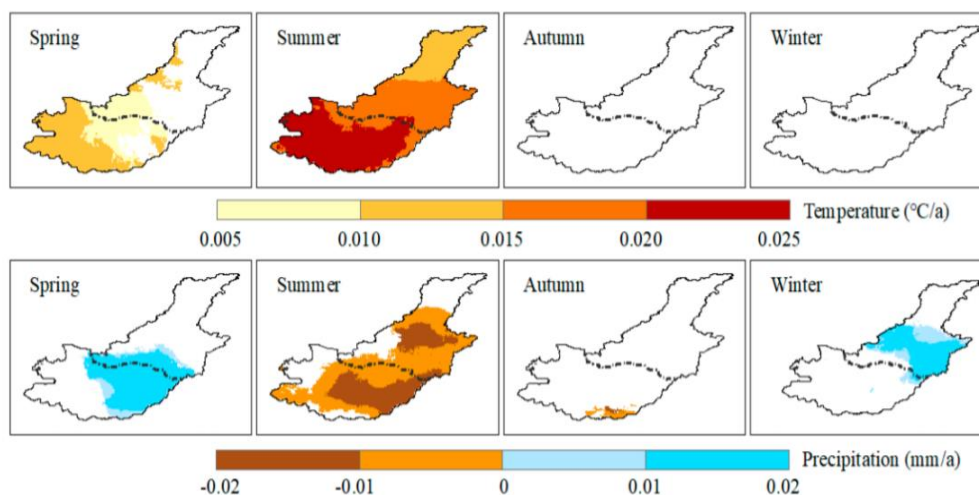


Рисунок 20. Пространственное распределение трендов изменения ($p < 0,05$) сезонной температуры (вверху) и Осадки (ниже) над Селенгобайкальским бассейном с 1982 по 2020г.

Уровень осадков на большей части региона показал заметную тенденцию к снижению в течении последних трех десятилетий (рис. 19 б). Регионы в восточной и южной частях исследованного района были отмечены заметным снижением количества осадков и самая высокая скорость изменения $-0,013\text{мм}$, тогда как в северо-восточной области наблюдалась противоположная тенденция уровня значимости на уровне $0,05$. В большинстве регионов летом выпадают осадки и наблюдаются тенденции к снижению, а зимой и весной - тенденции к увеличению (рисунок 20).

Стоит отметить, что увеличение общего количества осадков в течение весны и зимы было недостаточно для компенсации снижения летних показателей; Таким образом, годовые осадки показали тенденцию к снижению с пространственным распределением аналогичным годовому количеству осадков летом.

3.9.3 Состояние и изменение растительности

3.9.4 Состояние растительности

Как показано на рисунке 21, луга составляют 51,05%, леса 36,91%, водоемы 6,48%, обрабатываемые земли 3,54% и голые земли составляют 1,34% от общего бассейна соответственно, в то время как на другие типы землепользований приходится менее 1%.

Пастбища, которые занимают более половины всего бассейна, являются наиболее преобладающим земным покровом и в основном распределены по всему монгольскому сектору. Лес, другой преобладающий земельный покров составляет более 37% от общей площади, и он в основном распределен в российских частях.

Обрабатываемые земли в основном распределяются в прибрежных районах реки Уда, а также в низовьях реки.

Река Селенга и голые земли в основном распространены в южной части Монголии. Далее в работе сосредоточено внимание на анализе лесов и лугов.

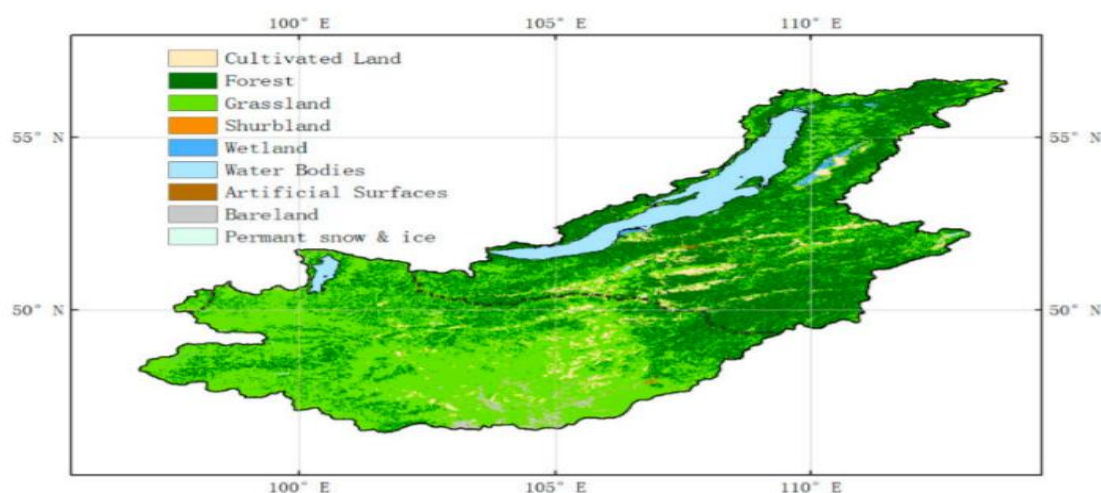


Рисунок 21. Пространственное распределение различных типов растительности в

Селенга-Байкальском бассейне на основе

GlobeLand30 в 2010 году.

Среднее значение NDVI в вегетационный период с мая по сентябрь по данным (Лаврентьевой, Меркушева и Убугунов [52]) демонстрировали пространственно неоднородную картину в период с 1982 по 2020гг. (Рисунок 22а). Как и ожидалось, NDVI в целом соответствует пространственной структуре типов растительности.

Выявлены в этой области более высокие значения в лесных районах на севере и более низкие значения в пастбищах.

Средний NDVI леса, который был в основном распространен в северо-западной и юго-восточной частях Селенга-Байкальского бассейна составил 0,667. Пастбища, которые покрывали южную часть бассейна, имели относительно низкий средний NDVI (0,542)

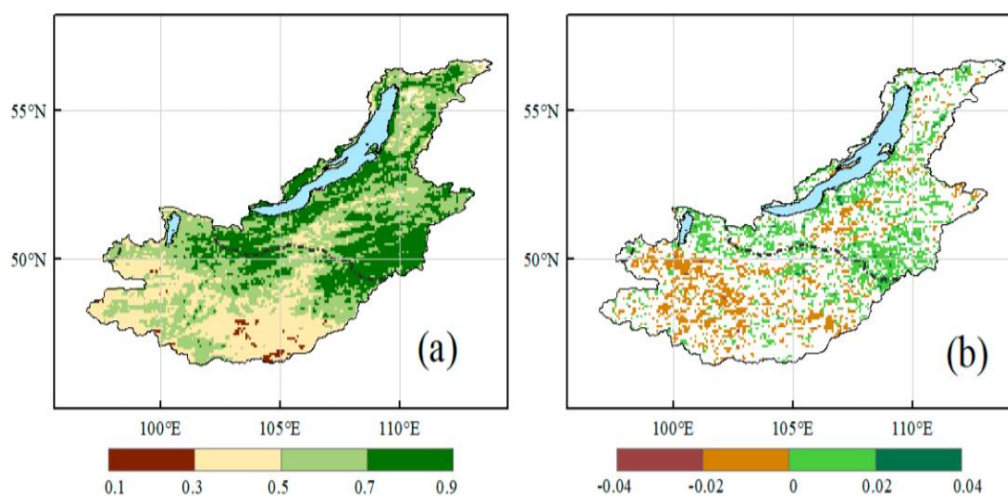


Рисунок 22. Пространственное распределение (а) многолетнего среднего NDVI и (b) его трендов ($p < 0,05$) в течение вегетационного периода с 1982 по 2020гг.

3.9.5 Изменение растительности

Как показано на Рисунке 22b, этот бассейн показал различные тенденции в NDVI с 1982 по 2020 гг. В общей сложности 21,74% региона показали значительную тенденцию к росту, в то время как 14,35% площади показали значительную тенденцию к снижению, а стабильные районы составили 63,91%. Более того, изменения растительности в Селенга-Байкальском бассейне показали явные региональные особенности.

Изменения среднего NDVI в течение вегетационного периода указывают на озеленение растительности вдоль вышеупомянутой полосы северо-запад-юго-восток в дополнение к межгорным впадинам и юго-восточным горным районам. Тем не менее, тенденция к снижению растительности была в основном обнаружена в южной части монгольского сектора, предполагается, что большая часть Монголии пережила заметную деградацию растительности.

Изменения в годовом приросте растительности лесов и лугов были эквивалентны на основе сравнение месячных значений NDVI для типов земного покрова до и после 2000 года (рисунок 23). лес и пастбища деградировали летом и улучшились весной и осенью, но деградация луга была более очевидной. Кроме того, на величину NDVI зимой влияют снежный покров и таким образом, величина не может точно отражать рост растительности. Тем не менее, тенденции изменения NDVI для различных типов растительности в последнее время изменялись последние 30 лет (Таблица 3.9.1).

Лес показал значительные тенденции к росту, 30,19% этих площадей демонстрируют значительную тенденцию к росту, и только 7,03% продемонстрировали значительную тенденцию к снижению активности растительности.

Стоит отметить, что улучшение роста лесов во всем бассейне в основном связано с вклад улучшения лесов в России, где тенденция к росту достигла 32,79%, а тенденция к снижению составила всего 4,51%. В противоположность этому, пастбища демонстрируют как увеличение, так и уменьшение тенденции, которые составили 14,31% и 18,09% от общей площади лугов, соответственно. Эта тенденция в основном появилась в Российской части территории, а тенденция к снижению - в основном в Монголии. Тенденция к снижению (21,09%) стала более доминирующей, чем тенденция к росту (11,86%). Напротив, тенденция к увеличению лугопастбищных угодий в России (21,64%) значительно перевесила тенденцию к увеличению (8,33%).

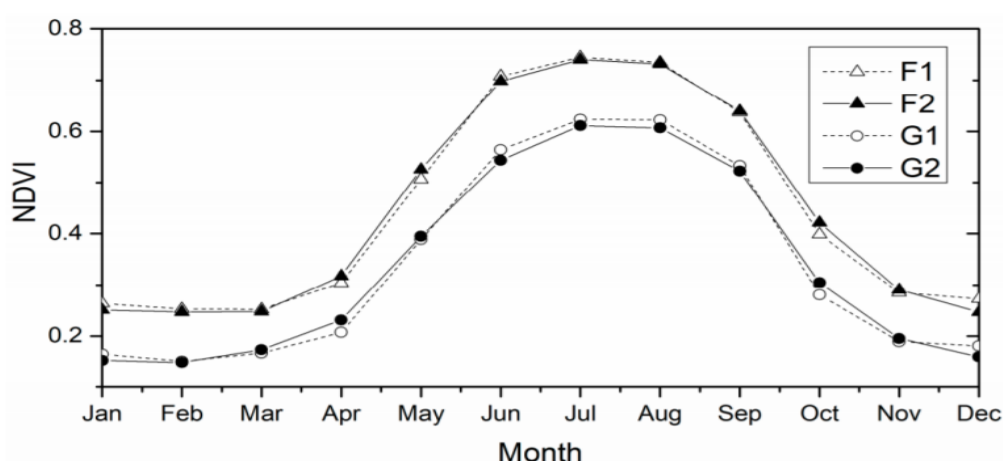


Рисунок 23. Годовые временные ряды NDVI для лесов и лугов за период 1982–1999 гг. И 2000–2020 гг. F1: лес в 1982–1999 гг. ; F2: лес в 2000–2020 гг. ; G1: пастбища в 1982–1999 гг. ; G2: луга в течение 2000–2020 гг.

Таблица 3.9.1 Статистические результаты тенденции изменения NDVI для разных типов растительности в вегетационный период.

Тренд	Лес			Луга		
	Общее	В Монгол	В Росси	Общее	В Монгол	В России
Увеличение (%)	30,19	18,13	32,79	14,31	11,86	21,64
Уменьшение (%)	7,03	17,01	4,51	18,09	21,09	8,33
Незначительны	62,78	64,86	62,70	67,60	67,05	70,03

3.9.6 Связь между NDVI и климатическими факторами

Частичный корреляционный анализ был выполнен для оценки реакции NDVI на температуру воздуха и осадки. Как показано на рисунке 24, имели место заметные пространственные различия в частичной корреляции, коэффициенты между средним NDVI в течение вегетационных периодов и годовой температурой и атмосферными осадками. В целом, NDVI отрицательно коррелировал с температурой воздуха и положительно коррелирует с осадками в южной части Селенга-Байкальского бассейна, который находится в пределах Монголии.

Тем не менее, NDVI был положительно коррелирован с температурой воздуха к востоку от озера Хубсугул, где годовое количество осадков превышает 400 мм. Наряду с этим, NDVI был отрицательно коррелирован с осадками и положительно коррелирован с температурой в юго-восточном бассейне, который находится вблизи национальной границы между Монголией и Россией.

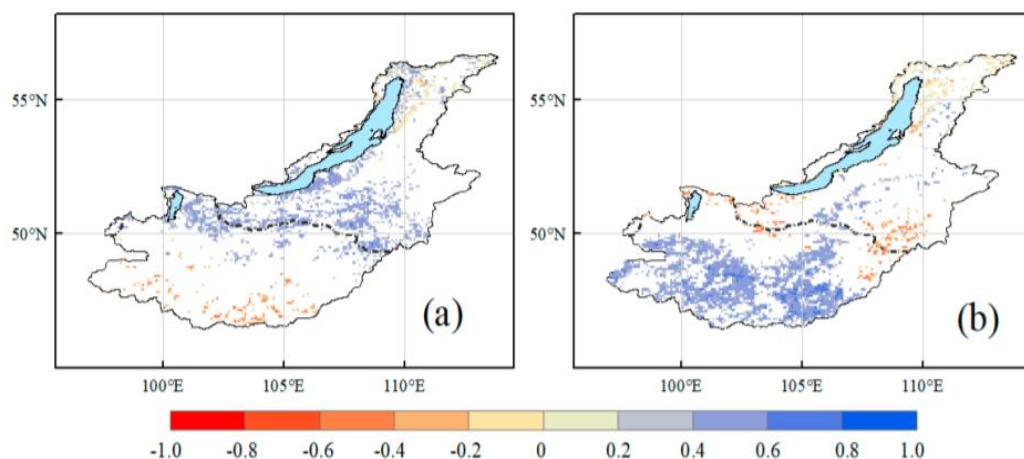


Рисунок 24. Пространственное распределение коэффициентов частичной корреляции ($p < 0,05$) (а) между NDVI и температурой и (б) между NDVI и осадками.

Как правило, реакция NDVI на изменение климата в первую очередь связана с количеством осадков в исследуемом регионе. Как показано на рисунке 24b и в таблице 4.1.1, 50,53% сухих регионов, где среднегодовое количество осадков составляет менее 350 мм, наблюдается положительная корреляция ($p < 0,05$) между NDVI и осадками. Кроме того, 4,65% сухих регионов показали отрицательные значения корреляции ($p < 0,05$) между NDVI и температурой. В относительно влажных регионах, где в среднем годовое количество осадков превышает 350 мм, реакция NDVI на температуру и количество осадков отличаются от сухих регионов. По данным статистического анализа, 26,58% влажных районов показал положительную корреляцию ($p < 0,05$) между NDVI и температурой воздуха, а также площадь с положительная корреляция между NDVI и осадками (49,68%) была почти равна площади с отрицательная корреляция (50,32%), тогда как только 8,59% и 5,72% этих регионов показали значительный ($p < 0,05$) положительная и отрицательная корреляции соответственно.

Таблица 4.1.1 Частичные коэффициенты корреляции для отношений между NDVI и температурой (вверху) и между NDVI и осадками (ниже) в разных водных условиях

Отношения	Корреляция	Сухие регионы	Влажные регионы
NDVI и температура	Позитивная	1,14	26,58
	Негативная	4,65	0,89
	Незначительная	94,21	72,53
NDVI и количество (%)	Позитивная	50,53	8,59
	Негативная	0,40	5,72
	Незначительная	49,07	85,69

Как показано в таблице 4.1.2, реакция лесов и лугов на климатические факторы, т.е. температуру воздуха и осадки, заметно отличались. В целом 25,81% леса показали значительную положительную корреляцию ($p < 0,05$) между NDVI и температурой, в отличие только от 11,57% леса. По сравнению с лесными районами, большая площадь пастбищ показала положительную корреляцию между NDVI и осадками, которые наблюдались в 33,68% пастбищных угодий ($p < 0,05$), в то время как значительная положительная корреляция ($p < 0,05$) между NDVI и температурой наблюдалась только в 6,95% случаев пастбищ.

Таблица 4.1.2 Частичные коэффициенты корреляции для соотношений между NDVI и температурой (вверху) и между NDVI и осадками (ниже) в разных типах растительности.

Отношения	Корреляция	Лес	Луга
NDVI и температура	Позитивная	25,81	11,57
	Негативная	0,81	2,79
	Незначительная	73,37	85,64
NDVI и количество (%)	Позитивная	6,95	33,68
	Негативная	5,32	2,73
	Незначительная	87,72	63,59

3.9.7 Заключение

3.9.8 Реакция растительности на климатические переменные между сухими и влажными условиями

В глобальном масштабе, в земной экосистеме выбранной территории наблюдается общая тенденция к озеленению (от 25% до 50%), что в основном можно объяснить внесением удобрений CO₂, осаждением азота, изменением климата и изменением земного покрова [66]. Однако доминирующие факторы, способствующие росту растительности, могут отличаться в региональном масштабе. В регионах с ограниченным количеством солнечной энергии, таких как Тибетское нагорье и другие высокогорные районы, потепление, как правило, оказывает наибольшее влияние на озеленение [67–70], в то время как с ростом засушливости окружающей среды влияние доступности воды на динамику растительности возрастает [71–74].

Для Селенга-Байкальского бассейна, который является одновременно засушливым и полузасушливым регионом, растительность ответила в отличие от климатических переменных в различных гидротермальных условиях. В засушливых регионах, где среднегодовое количество осадков менее 350 мм, рост растительности более чувствителен к осадкам, чем температура и снижение растительности в основном связаны с широко распространенным стрессом от засухи [75–77].

Осадки являются доминирующим фактором, влияющим на рост растительности в таких ограниченных по воде [76,78,79], хотя в относительно влажных регионах, где среднегодовое количество осадков превышает 350 мм, осадки обычно являются менее ограничивающим фактором. И даже негативных отношений не наблюдалось между NDVI и осадками в регионах с высоким уровнем осадков, таких как район Хубсугул

бассейн Селенга-Байкал, что согласуется с предыдущими исследованиями, например, [19,77,80].

Это аномальная взаимосвязь можно объяснить эффектом насыщения растущих осадков на растительность рост [80], при котором чрезмерное осаждеие ингибирует рост. Кроме того, увеличивается количество осадков приводит к увеличению облачности и уменьшению поступающей солнечной радиации, что неблагоприятно для Рост растений после удовлетворения требований влажности [77]. В регионах с низкими температурами и относительно сильные осадки, пространственно-временная неоднородность динамики растительности в основном определяется изменениями температуры [81]; следовательно, общая ограниченная температура, но влажные условия при температуре, оказывающей более существенное влияние на рост растительности [82].

4.2 Реакция лугов и лесов на температуру и количество осадков

Реакции роста растительности на климатические переменные представляют очевидные региональные различия. Осадки были доминирующим фактором, влияющим на рост хвойных лесов и лугов в Синьцзяне, Китай [54]. Тем не менее, луга показали относительно высокую положительную корреляцию с осадки и лесные экосистемы, и были в основном ограничены температурой в северо-восточном Китае [83].

В бассейне Селенга-Байкал результат соответствовал результатам предыдущих исследований на Северо-востоке Китая. В целом для лугов характерен полузасушливый и континентальный климат, а для лесов обычно распространяются в районах с относительно более высокой влажностью; поэтому осадки, вероятно, будут доминирующий фактор роста растительности на пастбищах [84], в то время как температура является

основным фактором влияющим на рост в лесах [83], особенно в холодном умеренном поясе. Осадки являются доминирующим фактором, влияющим на рост пастбищ в бассейне Селенга-Байкал.

Предыдущее исследование в Монголии показало, что летние осадки являются основным фактором, сдерживающим рост растительности на пастбищах [85], а уменьшение осадков снижает содержание воды в почве, что не способствует росту пастбищ. Кроме того, происходит сгущение активного слоя и грунтовых вод инфильтрация из-за потепления климата и оттаивания вечной мерзлоты может привести к высыханию верхнего слоя почвы и подавляют рост луговой растительности, имеющей мелкую корневую систему [86]. Тем не менее, леса в холодных районах Северного полушария преобладают температуры и нечувствительны засухе [87,88].

Повышенная температура была основным фактором озеленения леса [89], а дерево рост считается чувствительным к температуре [90–92]. Кроме того, вечная мерзлота является важный источник почвенной воды для лесов летом [22,93] и более высокие летние температуры привести к таянию мерзлой почвы, тем самым снабжая лес водой. Следовательно, потепление может быть благоприятно для роста растений в лесных районах [82].

4.3 Влияние человеческих нарушений на динамику растительности

Следует отметить, что антропогенное воздействие является важной движущей силой деградации экосистем. в сочетании с природными факторами [94], и интенсификация человеческой деятельности привела к драматическим изменениям в землепользовании и серьезно пострадавшие природные экосистемы [24]. Селенгобайкальский бассейн в настоящее время сталкиваются с изменениями в землепользовании в связи с урбанизацией, расширением сельскохозяйственной деятельности, добычей полезных ископаемых, рост поголовья скота, вырубка леса и лесные пожары в условиях глобального потепления и быстрых экономических изменений [95,96]. Население Монголии более чем утроилось со второй половины 20-го века, и это сопровождалось увеличением доли городского населения с 35% до 68,5%, что вызывает значительное увеличение использования поверхностных водных ресурсов [97]. Как важная основа экономики региона, добыча полезных ископаемых является основным потребителем воды, что привело к увеличению показателей водозабора и загрязняющие нагрузки, возникающие на участках добычи [98]. В результате Селенга Река, берущая начало в горных районах Монголии и являющаяся крупнейшим притоком Озеро Байкал пережило период нехватки воды за последние два десятилетия [99], а растительность вдоль р. Селенга в межгорных районах наблюдалась тенденция к снижению, совпавшая с пониженными водными условиями [26].

Кочевничество по-прежнему является важной особенностью сельского образа жизни, а животноводство является основным источником дохода [96]. Выпас скота, который способствует вмешательству экосистемы с наибольшей интенсивностью, и, следовательно, имеет самые серьезные последствия, было самым серьезным нарушением в пастбищной экосистеме [100], хотя в последние десятилетия растительность вырастала

по всей Монголии был сильно продвинут частым выпасом [34,101–105]. Источники деградации лесов включают пожары, лесозаготовки и человеческие нарушения в живой почве [106]. Частые и растущие пожары в последние годы оказали значительное воздействие на леса, а в период с 1997 по 2000 год произошли лесные пожары более 30 000 га каждый год в Сибири и около 650 000 га над Читой, исходя из правительственного доклада о состоянии окружающей среды [107]. Кроме того, площадь ожога увеличилась почти в 200 раз в лесных районах в бассейне реки Хилок, притока Селенги Река, в течение последних двух десятилетий [108]. Накопление водонапорных периодов летом усугубляет проблему нехватки воды в районах вниз по течению и приводит к превращению леса в пастбища [95,109–111], и это преобразование может быть причиной уменьшения значений NDVI в летом в районах, отнесенных к лесу.

Выводы

Представленное вашему вниманию исследование выявило динамику роста растительности и ее реакцию на климатические переменные в бассейне реки Селенга-Байкал в период с 1982 по 2015 год. Повышение температуры и уменьшение осадков, хотя динамика растительности высокая пространственная неоднородность, в основном обусловленная изменением климата и антропогенными воздействиями. В большинстве ограниченные водой районы, где среднегодовое количество осадков было ниже 350 мм, растительность рост был положительно коррелирован с осадками, тогда как в холодном умеренном поясе чувствителен к температуре. Температура является основным фактором, ограничивающим рост лесной растительности, тогда как осадки являются ограничивающим фактором для пастбищ. Дополнительно растительность Селенга-Байкал Бассейн связан с человеческими нарушениями, такими как урбанизация, добыча полезных ископаемых, увеличение пожаров, незаконные заготовка леса и выпас скота. Наши результаты полезны для понимания динамики растительности в полуаридные районы средних и высоких широт и могут играть важную направляющую роль в растительности и защита окружающей среды на фоне глобального изменения климата.

Список литературных источников

1. Кондратьев, К.Я. Актинометрия. – Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1965. – 690, [1] с., 1 л. карт.: рис.
2. Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008 г., 145 с.
3. Jakubauskas M.E., Price K.P. Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole pine forests. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1997. No 63. P. 1375–1381.
4. Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных Landsat ТМ для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исследования Земли из космоса. 2012. № 2 С. 53-61.
5. Чабан Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2013г., - 96 с.
6. Журкин И.Г., Автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования: учебник для вузов / И.Г.Журкин, Н.К. Шавенько; под общ. ред. И.Г.Журкина. – М.: ООО «Диона», 2013. – 456 с.
7. Лабутина И.А., Балдина Е.А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 168 с.
8. Чабан Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2013г., - 96 с.

9. Using the USGS Landsat 8 Product [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>, доступ свободный (дата обращения 11.03.2017 г.).

10. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010, - 560 с., 32 с. цв. вкл.

11. Малышева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. – МГУЛ Москва, 2012. — С. 151.

3. Горбачёв В.Г. Масштаб технологии и пределы роста. Принцип переломных точек в эволюции систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.integro.ru/system/ots/evolution/s_curve.htm, доступ свободный (дата обращения 16.05.2017 г.).

4. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Алфёрова А. С. Комплексный анализ космических снимков для выявления изменений при мониторинге территорий // Сборник материалов V международного научного конгресса ГЕО-Сибирь-2009. — Т. 4 из Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. Ч.2. — СГГА Новосибирск, 2009. — С. 181–185.

5. Данилова И.В. Методика пространственного моделирования лесовосстановительной динамики на основе данных дистанционного

зондирования: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. 25.00.34. Красноярск, 2014 – 186 с.

6. Егоров В.А., Барталёв С.А. Построение временных серий улучшенных композитных изображений по данным MODIS для мониторинга растительности // Сб. тезисов конференции на диске «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2006. 29.

7. Ермошкин И.С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт. / ArcReview: современные геоинформационные технологии. – 2009. – №1. – с. 12-13.

8. Жарко В.О. Методы обработки данных спутниковых измерений спектрально-временных характеристик отражённого излучения для дистанционной оценки параметров лесного покрова: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. 01.04.01. Москва, 2015. – С. 131.

9. Жарко В.О., Барталёв С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектральноотражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11 № 3. С.159-170.

10. Жирин В.М., Князева С.В. Оценка возможностей дешифрирования лесообразующих пород по космическим снимкам IKONOS / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. В.6. Т.2. С. 373-379.

11. Лабутина И.А., Балдина Е.А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 168 с.
12. Лавренко Е.М. , В.Б. Сочава. Геоботаническая карта СССР. М. 1 : 4 000 000 / Под ред. Е.М. Лавренко, В.Б. Сочавы. М.: ГУГК. 8 листов. 1956.
13. Лупян Е.А., Барталёв С.А., Толпин В.А. Возможности и опыт использования спутниковых сервисов семейства Созвездие-Вега для решения задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. // Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) "Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве". СанктПетербург. 16-17 сентября 2015. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 41-46.
14. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник / И.К. Лурье. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.: с илл., табл.
15. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.:ГЕОС, 2010. – 416 с. + цв. вкл.
16. Малинников В.А Теория и методы информационного обеспечения мониторинга земель (тематическая обработка видеоизображений): диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. 05.24.04. Москва, 1999 – 317 с.
17. Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008 г., 145 с.

18. Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М.
Спектрометрирование аэроландшафта. Учебное пособие для студентов М.:
Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2008 г., 120 с.