Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский государственный университет
Факультет географии и геоинформатики
Кафедра геодезии и космоаэрокартографии

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Топаз
«23» апреля 2024 г.

СОГЛАСОВАНО
Декан факультета
_____ Е.Г. Кольмакова
«25» апреля 2024 г.

Дистанционная спектрометрия

Электронный учебно-методический комплекс
для специальности:
1-31 02 03 «Космоаэрокартография»

Регистрационный № 2.4.2-24/480

Авторы:
Шалькевич Ф.Е., доцент кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета, кандидат биологических наук, доцент;
Давидович Ю.С., преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета.
Шестаков Н.А., преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета.

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ 29.08.2024 г., протокол № 1.

Минск 2024

УДК 528.8.044(075.8)
Ш 188

Утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ
Протокол № 1 от 29.08.2024 г.

Решение о депонировании вынес:
Совет факультета географии и геоинформатики
Протокол № 9 от 25.04.2024 г.

Авторы:

Шалькевич Франц Емельянович, доцент кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета, кандидат биологических наук, доцент;

Давидович Юрий Сергеевич, преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета.

Шестаков Никита Алексеевич, преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии Белорусского государственного университета.

Рецензенты:

кафедра «Геодезия и аэрокосмические геотехнологии» Белорусского национального технического университета (заведующий кафедрой Рак И.Е., кандидат технических наук, доцент);

Катковский Л.В., заведующий лаборатории дистанционной фотометрии отдела аэрокосмических исследований НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ, доктор физико-математических наук, профессор.

Шалькевич, Ф. Е. Дистанционная спектрометрия : электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Ф. Е. Шалькевич, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков ; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии. – Минск : БГУ, 2024. – 114 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 107–114.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) «Дистанционная спектрометрия» предназначен для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография». В ЭУМК изложены основные понятия и этапы развития дистанционной спектрометрии природных и антропогенных объектов, рассмотрены основные факторы, влияющие на спектрометрические измерения, теоретические физические основы дистанционного зондирования Земли, технологии и методика работ с данными наземных спектрометрических измерений. Представлена тематика лабораторных работ, перечень заданий в тестовой форме, вопросы для итогового контроля знаний.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА 6
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ..... 8
1.1. Введение в дисциплину «Дистанционная спектрометрия» 8
1.1.1. Предмет и задачи дисциплины. Связь с другими дисциплинами и науками. Роль дисциплины в становлении специалистов в сфере картографо-геодезической деятельности 8
1.1.2. Теоретические основы дисциплины, основные понятия и определения 9
1.1.3. История развития дистанционного спектрометрирования 11
1.2. Спектрально-отражательные свойства компонентов ПТК 14
1.2.1. Понятие об агроэкосистемах и агроландшафтах..... 14
1.2.2. Физические основы дистанционного зондирования и спектрально-отражательные свойства агроэкосистем 16
1.2.3. Особенности спектрального отражения почвенного покрова и обнажений..... 19
1.2.4. Спектральные коэффициенты яркости растительных сообществ. Особенности спектрального отклика различных видов сельскохозяйственных культур 24
1.2.5. Изменчивость спектральных коэффициентов яркости элементов ландшафта..... 40
1.3. Методология наземного спектрометрирования..... 42
1.3.1. Введение в наземные, воздушные и космические методы спектрометрирования 42
1.3.2. Специфика наземных наблюдений за спектральными характеристиками ПТК 43
1.3.3. Полевые наблюдения за биофизическими и спектральными характеристиками агроэкосистем 44
1.3.4. Методика наземного полевого спектрометрирования агроэкосистем. Изучение растительности агроэкосистем на основе материалов дистанционного зондирования. Факторы, влияющие на точность и достоверность наземного спектрометрирования..... 46
1.4. Постобработка результатов полевого спектрометрирования 47
1.4.1. Подготовка данных к компьютерному анализу. Подготовка исходных данных для фотометрических расчетов..... 47
1.4.2. Параметры бортовой съемочной аппаратуры. Параметры, характеризующие условия съемки..... 48
1.4.3. Инструментальные и машинные денситометрические измерения..... 48
1.5. Спектральная аппаратура..... 50
1.5.1. Спектральная аппаратура дистанционного зондирования оптического диапазона длин волн (спектрометры, спектрорадиометры и пр.). Спектральные приборы для аналитических применений. Метрологическое обеспечение измерений. Опыт республики Беларусь в развитии спектрального оборудования на основе работ Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного

университета. Устройство и особенности работы фотоспектрорадиометра (ФСР). 50
1.6. Дистанционная спектрометрия 55
1.6.1. Определение спектральной яркости природных объектов методами многозональной аэрокосмической съемки. Методика автоматизированного решения обратных фотометрических задач 55
1.6.2. Верификация спутниковых данных с соответствующими полевыми измерениями 56
1.7. Методы цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных 57
1.7.1. Цели и задачи цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных. Программное обеспечение 57
1.7.3. Методы тематической обработки ДЗЗ. Экспериментальная оценка точности 63
1.7.4. Мультиспектральные данные ДЗЗ. Спутниковые системы Landsat и Sentinel. Гиперспектральные данные ДЗЗ. 68
1.8. Геоинформационный анализ спектрометрических данных 71
1.8.1. Сбор, систематизация и геоинформационный анализ данных. 71
1.8.2. Векторизация. Создание векторной карты агроландшафтов. Маскирование изображений. Методы зональной статистики в ГИС..... 73
1.8.3. Анализ сезонной динамики значений яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. 76
1.9. Статистические методы анализа спектрометрических данных 79
1.9.1. Математико-статистический анализ первичных данных. Инструменты зональной статистики ArcGIS и MS Excel 79
1.9.2. Вторичные методы статистической обработки. Корреляционный анализ, регрессионный анализ, факторный анализ, дисперсионный анализ, методы сравнения первичных данных двух или нескольких выборок 80
1.9.3. Особенности обработки данных в программном комплексе STATISTICA 10.0 82
1.10. Спектральные базы данных 85
1.10.1. Способы организации и хранения спектрометрических данных. Создание базs данных спектральных образцов 85
1.10.2. Обзор существующих баз данных спектральных образцов растительности. Атлас спектральных кривых отражения природных образований Л. Е. Кринова. ASTER Spectral Library. База данных ресурса GIS-Lab. Опыт белорусских ученых по созданию спектральных баз данных 86
1.11. Прикладные задачи дистанционного спектрометрирования агроландшафтов 89
1.11.1 Перспективы развития отрасли. Системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения 89
1.11.2. Распознавание видовой структуры агроэкосистем. Картосхемы динамики севооборотов по материалам ДДЗ..... 91

1.11.3. Детектирование фаз вегетации зерновых культур по данным ДДЗ. Картосхемы динамики объема фитомассы и текущего состояния посевов . 94
1.11.4. Детектирование и картографирование эрозионных процессов на пахотных землях 96
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 99
2.1. Подготовка полевых спектральных данных к компьютерному анализу 99
2.2. Радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция ДДЗ с помощью модуля FLAASH программного пакета ENVI..... 99
2.3. Автоматизированное дешифрирование и построение кривых спектральной яркости в ENVI 99
2.4. Создание векторной карты полей для пространственного моделирования и анализа в ArcGIS (модуль Spatial Analyst)..... 100
2.5. Геоинформационный анализ спектральной информации методами зональной статистики ArcGIS (модуль Spatial Analyst), построение кривых спектральной яркости..... 100
2.6. Знакомство с интерфейсом программы STATISTICA 10.0..... 100
2.7. Корреляционный анализ значений яркости, полученных по спутниковым снимкам и на основе полевого спектрометрирования..... 100
2.8. Проверка распределения данных и дисперсионный анализ спектральных данных..... 101
2.9. Разработка структуры электронной базы данных спектральных образцов сельскохозяйственных культур в MS Access 101
2.10. Наполнение базы данных полевыми спектральными образцами агрокультур..... 102
2.11. Наполнение базы данных дистанционными спектральными образцами агрокультур..... 102
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ 103
3.1. Примерный перечень вопросов к зачету по учебной дисциплине «Дистанционная спектрометрия» для студентов 4 курса специальности «Космоаэрокартография»..... 103
3.2. Примерный перечень заданий в тестовой форме 103
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ 105
4.1. Учебно-методическая карта по учебной дисциплине..... 105
..... **Ошибка! Закладка не определена.**
4.2. Рекомендуемая литература 107
4.3. Электронные ресурсы..... 114

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Аэрокосмическое зондирование, энергично развивающееся в последние десятилетия, открыло наукам о Земле новые методы в изучении природной среды. В настоящее время дистанционные методы нашли широкое применение в различных областях наук географического цикла. Аэрокосмические снимки, дающие объективное изображение земной поверхности на момент съемки, являются важнейшим источником информации о состоянии и изменениях природной среды. Выполненные исследования и производственные работы показали высокую перспективность применения дистанционных методов при тематическом картографировании. Использование материалов дистанционных съемок позволяет значительно повысить оперативность составления тематических карт, их объективность, точность и детальность. Однако применение аэрокосмических снимков и спектров при тематическом картографировании требует знаний о природе формирования аэрокосмического изображения, методических и технологических вопросов их применения. Учитывая фактическое отсутствие учебных пособий по дистанционному спектрометрированию, назрела потребность в разработке ЭУМК.

Основная цель ЭУМК – научить студентов логически обоснованно и географически правильно анализировать спектральные данные.

ЭУМК «Дистанционная спектрометрия» является продолжением курса «Методы дистанционных исследований», поэтому в ЭУМК рассматриваются только основные методологические вопросы, относящиеся к спектрометрической съемке.

Теоретический раздел ЭУМК базируется на лекционном материале, который в логической последовательности раскрывает методические и технологические вопросы использования материалов дистанционных съемок при изучении географических объектов. Рассматриваются физические основы формирования аэрокосмического изображения, дается характеристика материалов дистанционных съемок и их использование при спектральном анализе. Приведены спектральные дешифровочные признаки природных и антропогенных объектов. Изложены технология и методы спектральной обработки материалов дистанционных съемок.

Практический раздел ЭУМК включает лабораторные занятия, для проведения которых используются материалы, полученные в результате научных исследований (кривые спектральной яркости, тематические карты, аэрокосмоэталоны) и материалы дистанционных съемок, которые могут быть использованы в дальнейшей профессиональной деятельности.

Раздел контроля знаний содержит зачетные материалы, включая вопросы к зачету по дисциплине, а также примеры тестовых заданий.

Вспомогательный блок представлен учебно-программной документацией, включающей программу дисциплины «Дистанционная спектрометрия», перечень учебных и научных изданий, ресурсов сети интернет, необходимых для изучения указанной дисциплины.

Материалы ЭУМК будут способствовать формированию у студентов теоретических знаний и практических навыков при составлении и обновлении тематических карт по материалам МДС с использованием спектральных данных.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Введение в дисциплину «Дистанционная спектрометрия»

1.1.1. Предмет и задачи дисциплины. Связь с другими дисциплинами и науками. Роль дисциплины в становлении специалистов в сфере картографо-геодезической деятельности

Учебная дисциплина «Дистанционная спектрометрия» разработана для специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография».

Цель изучения дисциплины – формирование у студентов знаний, умений и навыков в области проведения работ по дистанционному спектрометрированию природных территориальных комплексов (ПТК) и последующей обработке полученных данных на основе современных компьютерных и информационных технологий.

Задачи учебной дисциплины:

- усвоение студентами основных терминов;
- изучение теории, методики и технологии дистанционного спектрометрирования;
- овладение современной приборной базой и программными средствами обработки и анализа спектрометрических данных.

Учебная дисциплина «Дистанционная спектрометрия» преподается студентам специальности 1-31 02 03 Космоаэрокартография на четвертом курсе в седьмом семестре. Дисциплина представляет техническое направление развития цифровых методов дистанционного зондирования. Знания и умения, приобретенные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин специализаций, связанных с решением картографо-геодезических задач, созданием тематических карт на основе материалов дистанционного зондирования, а также позволят использовать эти знания в сферах производства, связанных с геодезической и картографической деятельностью.

Учебная дисциплина «Дистанционная спектрометрия» относится к дисциплинам по выбору модуля «Спутниковое позиционирование и дешифрирование снимков» компонента учреждения высшего образования в системе подготовки специалистов в сфере картографо-геодезической деятельности.

Данная учебная дисциплина тесно связана со следующими учебными дисциплинами: «Индикационное картографирование», «Тематическое дешифрирование».

Дисциплина изучается в 7 семестре дневной формы получения образования. Всего на изучение учебной дисциплины «Дистанционная спектрометрия» по специальности 1-31 02 03 Космоаэрокартография отведено 102 часа, в том числе 48 аудиторных часов, из них: лекции – 22 часа, лекции в дистанционной форме – 4 часа; лабораторные занятия – 22 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – зачет.

1.1.2. Теоретические основы дисциплины, основные понятия и определения

Одним из методов получения информации об объектах земной поверхности является ***дистанционное зондирование***. Под этим термином понимается неконтактное изучение земной поверхности, воздушного пространства, земных недр, природных и техногенных процессов. Изучение происходит посредством измерения или регистрации с некоторого расстояния отраженного или собственного излучения специальными съемочными системами, последующей обработки и анализа получаемых данных. К дистанционному зондированию относят также иные методы исследования Земли – сейсморазведку, гравиразведку, эхолокацию и др. При изучении земельных ресурсов, кадастре или экологическом мониторинге используют преимущественно методы зондирования, основанные на регистрации электромагнитного излучения в оптическом и радиодиапазонах длин волн.

В настоящее время аэрокосмические методы имеют определяющее значение при разностороннем изучении и картографировании земной поверхности. Характерная особенность аэрокосмических методов состоит в том, что они являются дистанционными, не требующими прямого соприкосновения с объектом исследования и позволяющими свести непосредственные исследования к минимуму. Методы аэрокосмической съемки позволяют большую часть работы перенести в камеральные условия, увеличить скорость производства работ и вместе с тем увеличить достоверность и полноту результатов исследовательских и изыскательских работ.

Удобство работы со снимками заключается также в том, что к изображению можно обращаться неоднократно, изучать долгое время без больших затрат времени и средств, что затруднительно или невозможно при других методах, например традиционном для географии полевом экспедиционном методе исследований.

Однако самое главное заключается в том, что воздушные и космические снимки дают в руки исследователя новые сведения и факты, которые другими способами не могут быть получены.

Аэрокосмические методы, в отличие от традиционных, имеют ряд особенностей, которые и обуславливают их преимущества. *Обзорность* аэрокосмических снимков дает комплексное изображение ландшафтной структуры и позволяет проследить изменения компонентов биосферы на больших расстояниях и площадях в крупных региональных и глобальных размерах, при одних условиях съемки. При этом удается выявить на снимках ряд неизвестных ранее закономерностей и процессов, происходящих в географической оболочке Земли.

Аэрокосмические методы *позволяют изучать районы малодоступные для исследования их традиционными способами и средствами*. Малонаселенные районы, горные, заболоченные и пустынные территории, удаленные акватории Мирового океана, территории Арктики и Антарктики одинаково успешно могут подвергаться дистанционным съемкам из космоса.

Повторяемость аэрокосмических съемок позволяет осуществлять периодичность наблюдений заданных регионов с любой регулярностью (годы, месяцы, дни, часы, минуты), что представляет возможность проследить динамику отдельных процессов и явлений во времени. Аэрокосмическая информация может служить также исходным материалом для целей картографического мониторинга природной среды, а карты мониторинга могут использоваться как фактический материал для обновления ранее составленных тематических карт и оперативного принятия решений по предотвращению негативных последствий хозяйственной деятельности в том или ином регионе.

Аэрокосмические съемки *могут выполняться в широком диапазоне электромагнитного спектра от видимого до радиоволнового излучения*, что дает *возможность наблюдения в любое время года и суток, при любых погодных условиях, а также возможность изучения не только земной поверхности, но и объектов, находящихся на определенной глубине.*

Одномоментность аэрокосмического изображения открывает особые возможности в тех случаях, когда нужна сопоставимая картина местности. На аэрокосмических снимках отражены значительные территории на едином по времени уровне антропогенной измененности, поэтому они содержат вполне достоверные и сопоставимые данные для картографирования современного состояния природной среды. Непосредственное отражение на космических снимках получают различные виды использования земель, измененности ландшафтной структуры, состояние отдельных компонентов ландшафта (растительности, почв, поверхностных вод), стадии развития природных и антропогенных процессов.

Оперативность, быстрота получения информации, возможность доставки ее потребителю непосредственно в ходе приема с космического аппарата, а также использование компьютерных технологий для ее обработки позволяет представить информацию в разнообразных формах с высокой наглядностью результатов. К настоящему времени аэрокосмические методы выросли в одно из мощных средств исследования природы. Эти методы исследования природных и антропогенных объектов и комплексов географического пространства Земли имеют для географии принципиально важное значение. Область применения аэрокосмических методов для решения народнохозяйственных задач непрерывно расширяется.

Учебная дисциплина «Дистанционная спектрометрия» теоретически базируется на двух основных направлениях:

1. Оптическое дистанционное зондирование – это получение информации об объекте без контакта с изучаемым объектом путем анализа результатов измерения электромагнитного излучения в оптическом диапазоне длин волн.

2. Космическая спектрофотометрия – совокупность методов дистанционного измерения энергетических характеристик излучения в зависимости от длины волны. Объединяет разделы спектрометрии, фотометрии и метрологии.

Именно эти направления являются ее теоретической и методологической базой.

1.1.3. История развития дистанционного спектрометрирования

В основе дистанционных методов лежат представления о взаимосвязи и взаимозависимости всех явлений и процессов, совершающихся в земной коре и на ее поверхности. Впервые в Беларуси эти закономерности отметил крупный ученый-тектоник З.А. Горелик, опубликовав ряд классических работ: «О связи современного рельефа БССР с тектоническими структурами» (1957 г.), «Связь современного рельефа Полесской низменности с тектоническими структурами»(1958 г.), «Основные тектонические структуры БССР и их влияние на формирование современного рельефа» (1959 г.), «О происхождении Мозырской гряды» (1959 г.), «О влиянии соляных структур Припятской впадины на распределение гидрографической сети и некоторые данные об их развитии в мезокайнозое» (1961 г.), «О времени и причинах формирования Полесской низменности» (1965 г.) и др.

Впервые аэрогеологические и морфометрические методы при геолого-съемочных исследованиях были применены В.И. Гридиным при проведении работ в рамках Речицкой геолого-съемочной партии Белорусской гидрогеологической экспедиции, Управления геологии при Совете Министров БССР. Дальнейшее развитие аэрогеологического и морфометрического методов продолжилось в Институте геологических наук (ныне БелНИГРИ) в 1965–1966 гг. при выполнении темы № 37 «Структурно-геоморфологические особенности Припятской впадины». В это время В.И. Гридиным обобщены теоретические вопросы обоснования аэрогеологического и морфометрического методов (1966 г.).

Официальный отсчет применения методов дистанционного зондирования природных ресурсов Беларуси связан с приказом № 153 от 13 сентября 1966 года по Институту геологических наук Министерства геологии СССР. Параграф 2 приказа гласит: «На основании приказа № 296 Министерства геологии СССР от 22 июня 1966 года организовать с 10 сентября 1966 года при отделе региональной геологии Лабораторию аэрогеологического и морфометрического методов с включением в структуру Института. Основное внимание в работе Лаборатории уделить разработке методических руководств для поисков нефтегазоносных структур и геологического картирования. И. о. начальника Лаборатории аэрогеологического и морфометрического методов назначить Гридина Виталия Ивановича». Немного позднее в Белорусской гидрогеологической экспедиции была создана Опытно-методическая аэрогеологическая партия, у истоков которой стояли А.А. Святогоров, И.С. Коврижкина и др.

Насущные задачи геологоразведочных работ в Беларуси потребовали выбрать направления применения дистанционных методов при прогнозировании таких важных полезных ископаемых, как нефть, бурый уголь неогена и калийные соли. Впервые для территории Беларуси было осуществлено дистанционное зондирование горнорудных районов на примере Старобинского месторождения калийных солей.

С 1967 года начались широкомасштабные исследования по оценке нефтеперспективности территории Припятской впадины. В пределах восточной

части впадины были проведены детальные аэрогеологические исследования с целью прогнозной оценки нефтеносности Речицкой, Осташковичской, Тишковичской, Давыдовской, Первомайской, Барсуковской и других структур. Результаты исследований были внедрены и использовались в практике проведения геофизических и геологоразведочных работ. Кроме того, были проведены аэрогеологические исследования в районах Припятской впадины, практически не изученных геолого-геофизическими методами (Туровская депрессия). В результате исследований были выделены отдельные региональные и локальные структуры, часть из которых были подтверждены в дальнейшем геолого-геофизическими материалами. В этих исследованиях под руководством В.И. Гридина принимали участие Н.Н. Абраменко, Л.С. Гирилович, В.Н. Губин, Н.А. Капельщиков, В.Я. Коженов, Ю.М. Обуховский, И.А. Тяшкевич, А.В. Шевченко и др.

Параллельно с этими исследованиями проводилась оценка перспективности территории Припятской впадины на бурые угли неогена. Работы велись синхронно с бурением разведочных скважин, проводимых Белорусской геологоразведочной экспедицией Управления геологии при Совете Министров БССР. В результате аэрогеологических исследований выделены перспективные районы на бурый уголь неогена: Краснослободский, Пасека, Кольно, Большой Малышев, а также углепроявления и месторождения Бринев, Житковичи и др. Кроме того, в пределах Подлясско-Брестской впадины выполнена на основе аэрокосмических технологий и морфометрического метода оценка перспективности на бурый уголь. К сожалению, в пределах этого региона буровые геологоразведочные работы не проводились и не представляется возможность оценить эффективность аэрогеологических исследований.

В 1970–1972 гг. Лабораторией аэрогеологического и морфометрического методов БелНИГРИ выполнены «Структурно-геоморфологические исследования в северо-западной части Припятской впадины в помощь геофизическим работам». Впервые по результатам исследований в пределах Старобинской депрессии, в том числе и в пределах шахтных полей Старобинского месторождения калийных солей, выделены зоны разрывных нарушений поперечного (северо-восточного) простирания – Случская, Краснослободская, Чепельская и др. В дальнейшем эти зоны были подтверждены геофизическими и горнопроходческими работами. В частности, Чепельская зона (северо-западный разлом) по терминологии геофизиков отрезала 1/3 II шахтного поля, что потребовало проходки отдельного шахтного ствола с целью отработки заразломной зоны (Краснослободский участок).

Опытно-методической гидрогеологической экспедицией Управления геологии при Совете Министров БССР аналогичные исследования выполнены по территории V шахтного поля Старобинского месторождения калийных солей (Нежинский участок).

В пределах V шахтного поля выделены зоны разрывных нарушений субширотного и поперечного (северо-восточного) простираний.

В 1974 году Лаборатория аэрогеологического и морфометрического методов БелНИГРИ в соответствии с приказом по Министерству геологии СССР была передана в статус Лаборатории аэрометодов (г. Ленинград).

Минский отдел Лаборатории аэрометодов, который возглавил канд. геол.-мин. наук О.И. Карасев, в течение 1974–1992 гг. занимался оценкой нефтеперспективности на основе аэрокосмических технологий многих регионов СССР – Беларуси, Прибалтики, Ростовской области, Краснодарского края, Восточной Сибири, Дальнего Востока и других. В результате этих исследований были разработаны методика и технология обработки аэрокосмических снимков для изучения природных ресурсов, прежде всего нефти.

Кроме Минского отдела ЛАЭМ широкое применение аэрокосмические снимки получили в различных организациях Беларуси, занимающихся вопросами геологии, лесного хозяйства, изучения почвенного покрова, ландшафтной геоиндикации и другими.

В Белорусской гидрогеологической экспедиции Управления геологии при Совете Министров БССР Н.Н. Абраменко, В.Н. Губиным, И.Ф. Пастернацким, А.А. Святогоровым разрабатывались методы дешифрирования аэрокосмических снимков для нужд геологии. Итогом этих работ явилось построение космотектонических карт Беларуси масштаба 1:1 000 000 (1981 г. и 1983 г.). В БелНИГРИ была создана группа дистанционных методов под руководством В.Н. Губина. Дальнейшее развитие получили методика и технологии аэрокосмических исследований, которые отрабатывались на полигонах «Селява», «Полесский» и др.

Ф.Е. Шалькевичем и А.А. Лепешевым (Институт почвоведения и агрохимии) выполнены исследования по картографированию почвенного покрова на основе дистанционных методов. Основное внимание было уделено почвам, расположенным в пределах пойм крупных рек.

В ИПИПРЭ НАН Беларуси Ю.М. Обуховским разработана методика ландшафтной индикации природных объектов. Им опубликовано ряд монографий, в которых показаны региональные особенности лито- и гидроиндикации в Беларуси, а также основы индикации экзогенных процессов с применением аэрокосмических снимков.

В рамках Государственной научно-технической программы 72.03.р «Дистанционная диагностика» РНТЦ «Экомир» НАН Беларуси и Минприроды Республики Беларусь под руководством А.А. Ковалева выполнены комплексные дистанционные исследования по различным сферам природной среды: атмосфера, почвы, земельные и лесные ресурсы, геология и др. По результатам исследований опубликовано большое количество научных статей и ряд монографий.

В Институте экспериментальной ботаники НАН Беларуси А.Р. Понтусом была разработана система аэрокосмического мониторинга динамики природных и антропогенных экосистем Беларуси (на примере Березинского биосферного заповедника и Солигорского промышленного района). В работе использованы ретроспективные аэрофотоснимки (полученные с 1949 года) и космоснимки высокого и среднего разрешения, полученные в 80–90-х годах прошлого

столетия. Результаты работ используются и в настоящее время в ряде организаций Республики Беларусь, в том числе в системе Министерства лесного хозяйства.

Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь начало применять космические снимки с 1997 года после прохождения самого разрушительного урагана, вызвавшего массовые ветровалы и буреломы. С целью их оперативного картографирования были применены оперативные космические снимки. В этих работах участвовали РУП «Белгослес», УО «БГТУ», РУП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси, РУП «Космоаэрогеология» НАН Беларуси, ГУ «Беллесозащита» и ГУ «Беллесавиа». Кроме картирования и оперативной диагностики ветровалов, с помощью аэрокосмических средств решаются такие проблемы лесного хозяйства, как картографирование усыхающих еловых и сосновых насаждений, вырубок, зон подтопления, пожаров и др. Доказана приуроченность ветровалов и усыхания ельников к новейшим геодинамическим зонам земной коры и аномалиям магнитного и гравитационного полей Земли. С апреля 2002 г. в РУП «Белгослес» установлена и работает в штатном режиме станция приема космической информации «Сканэкс», с помощью которой ежедневно осуществляется прием космических снимков Метеор 3М (Россия) и Terra MODIS (США).

Нельзя не отметить белорусскую школу создателей космической аппаратуры – ИФ НАН Беларуси, ИТК (ОИПИ) НАН Беларуси, НИИПФП БГУ, предприятие «Пеленг» и др.

22 июля 2012 г. с космодрома Байконур ракетой «Союз-ФГ» был выведен на околоземную орбиту Белорусский космический аппарат (БКА). БКА оснащен панхроматической съемочной системой, позволяющей получать черно-белые снимки с разрешением 2,1 м, и мультиспектральной съемочной системой для получения снимков с разрешением 10,5 м в четырех спектральных диапазонах.

В настоящее время дистанционные методы развиваются в нескольких направлениях. Во-первых, совершенствуются летательные аппараты для съемки (используются спутники небольшого веса, а также БПЛА), создается новая аппаратура для съемок, развивается новый вид съемки – гиперспектральный, все большее применение находит радиолокационная съемка. Во-вторых, совершенствуются приемы и способы извлечения информации из снимков, чему способствует внедрение компьютерных технологий.

Современные дистанционные методы непрерывно и интенсивно развиваются и совершенствуются, используя новейшие достижения науки и техники. Однако, прогресс в развитии дистанционных методов в большой мере зависит от финансирования различных проектов, связанных с дистанционными методами.

1.2. Спектрально-отражательные свойства компонентов ПТК

1.2.1. Понятие об агроэкосистемах и агроландшафтах

В сфере сельского хозяйства первичным структурным звеном, где, собственно, и происходит взаимодействие человека с природой, являются

функциональные единицы – агроэкосистемы (или агробиогеоценозы). Надо, однако, отметить, что понятие это воспринимается неоднозначно. К примеру, по мнению Ю. Одума (1987), агроэкосистемы – это одомашненные экосистемы, которые во многих отношениях занимают промежуточное положение между природными экосистемами (луга, леса) и искусственными (города). Другой американский агроэколог Р. Митчелл считает, что подобно тому как морские свинки – это не обитатели моря и не представители отряда парнокопытных, так и агроэкосистемы — это не настоящие экосистемы, но и не самодовлеющие сельскохозяйственные единицы. Во всех агроэкосистемах экономические соображения влияют на структуру посевов и набор культур.

В свете современных представлений агроэкосистемы (агробиогеоценозы) – вторичные, измененные человеком биогеоценозы, ставшие значительными элементарными единицами биосферы; их основу составляют искусственно созданные, как правило, обедненные видами живых организмов биотические сообщества. Эти сообщества формируют и регулируют люди для получени сельскохозяйственной продукции. Агроэкосистемы отличаются высокой биологической продуктивностью и доминированием одного или нескольких избранных видов (сортов, пород) растений или животных. Выращиваемые культуры и разводимые животные подвергаются искусственному, а не естественному отбору. Как экологические системы агроэкосистемы неустойчивы: у них слабо выражена способность к саморегулированию, без поддержки человеком они быстро распадаются или дичают и трансформируются в естественные биогеоценозы (например, мелиорированные земли – в болота, насаждения лесных культур – в лес).

Заслуживает внимания определение Р. А. Полуэктова (1991), назвавшего агроэкосистемы специальным видом экосистем сельскохозяйственного поля, на котором произрастают культурные растения, обитают другие виды растений и животных и происходит сложная цепь физических и химических трансформаций энергии и вещества

Под агроландшафтом «понимается земельный массив, состоящий из комплекса взаимодействующих природных компонентов, а также элементов системы земледелия с относительно автономными водными, тепловыми и другими режимами с признаками единой экологической системы». Агроландшафт – это сложно организованная многомерная экосистема земли с определенным обликом и соответствующей структурой, функционирующая в зависимости от системы земледелия.

Агроландшафт следует рассматривать как территориальную единицу для решения вопросов формирования систем земледелия и землеустройства на экологической основе. Он может быть организован на определенных ограниченных территориях с возможностью саморегуляции, с определенным пищевым, водным и тепловым режимами. Агроландшафт, являясь антропогенным, формируется под воздействием сельскохозяйственной деятельности человека. Следовательно, в структуре агроландшафта должны найти отражение формирующие его элементы из организации территории и системы земледелия.

На современном этапе не удается выполнить важнейшего экологического требования – приведения темпов эксплуатации природных систем в равенство с интенсивностью самовосстановления этих систем. Природный ресурсный потенциал должен быть равен или больше уровня изъятия ресурсов и темпов изменения жизненной среды. Однако прогрессирующая деградация ресурсов говорит об обратном. Антропогенные возмущения в биосфере выше ее способности к саморегуляции (Н.Ф. Реймерс, 1990).

Для решения этой проблемы необходимо применять и использовать новые методы, новые подходы в исследованиях агроландшафтных систем – ландшафтно-экологический метод.

В свете современных представлений агроландшафты – вторичные, измененные человеком биогеоценозы, ставшие значительными элементарными единицами биосферы; их основу составляют искусственно созданные и, как правило, обедненные видами живых организмов биотические сообщества. Эти сообщества формируют и регулируют люди для получения сельскохозяйственной продукции. Агроландшафты отличаются высокой биологической продуктивностью и доминированием одного или нескольких избранных видов (сортов, пород) растений или животных. Выращиваемые культуры и разводимые животные подвергаются искусственному, а не естественному отбору. Как экологические ландшафты агроландшафты неустойчивы: у них слабо выражена способность к саморегулированию, без поддержки человеком они быстро распадаются или дичают и трансформируются в естественные биогеоценозы (например, мелиорированные земли – в болота, насаждения лесных культур – в лес).

1.2.2. Физические основы дистанционного зондирования и спектрально-отражательные свойства агроэкосистем

Спектральная отражательная способность является одной из главных характеристик, которая непосредственно проявляется на материалах дистанционного зондирования, являясь физической основой распознавания объектов по материалам аэрокосмической съёмки. Поэтому изучение спектральной отражательной способности представляет одну из актуальных проблем дистанционных методов исследований.

Графически коэффициенты спектральной яркости представляют в виде так называемой кривой спектральной отражательной способности. Ход кривых меняется в зависимости от состояния объекта. Например, различаются кривые сухой и влажной почвы, водоемов с чистой и загрязненной водой, лесов в разное время года. На рисунке 1 приведены примеры обобщенных кривых для типичных объектов Земли.

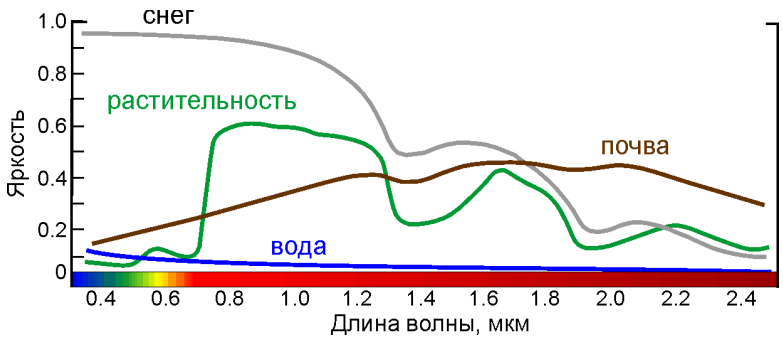

Рисунок 1 – Обобщенные кривые спектральной яркости типичных объектов, полученные в результате измерений на местности

Проанализировав кривые спектральной яркости, можно выделить на них отрезки, важные для описания свойств объекта, например локальные максимумы в зеленой и ближней инфракрасной области спектра у растительности, определить участки спектра, в которых различия яркости разных объектов наиболее существенны. Опираясь на кривые спектральной яркости, планируют, в каких участках спектра целесообразно производить съемку поверхности Земли.

К настоящему времени наиболее изучена спектральная отражательная способность геологических объектов, растительности, почв.

Фундаментальные исследования по спектрометрированию выполнил Е.Л. Кринов еще в 40-х годах прошлого века. Положив начало работам по оптике ландшафтов, он разработал первую спектрометрическую классификацию, которая со временем стала классической.

По отражательной способности в видимом диапазоне спектра все многообразие объектов в ландшафте можно разделить на четыре класса, каждый из которых отличается своеобразной кривой спектральной яркости: обнажения и почвы; растительные образования; водные поверхности; снежные поверхности.

На рисунке 2 римскими цифрами обозначен класс объектов, арабскими – тип объектов.

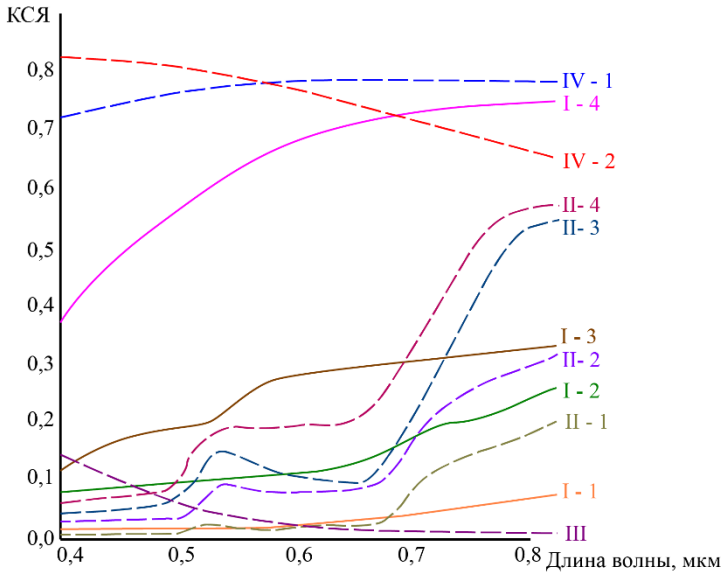

Рисунок 2 – Основные спектральные классы природных объектов по Е.Л. Кринову

Класс I – обнажения, почвы – включает в себя четыре типа: тип 1 – почвы чернозёмные и супесчаные, грунтовые дороги и т.п.; тип 2 – почвы оподзоленные суглинистые, шоссейные дороги, некоторые типы строений; тип 3 – пески, обнажения пустынь, горные породы; тип 4 – известняки, глина, различные светлые объекты. Для спектральных кривых этого класса характерным является постепенный подъем в сторону длинных волн, типы поверхностей различаются наклоном кривых.

Спектральная яркость горных пород зависит, прежде всего, от оптических свойств входящих в их состав минералов и химических элементов, а также от их дисперсности и влажности. Отличительная особенность почв – существенные различия в интегральной яркости. Наименьшей способностью отражать солнечное излучение обладают черноземы, наибольшей – сильнооподзоленные суглинистые почвы. На отражение солнечного света почвами влияют три основные группы веществ: светло-окрашенные соединения (карбиды, соединения кремния и алюминия) отражают излучение равномерно, но значительно; темные гумусовые вещества отражают свет слабо и равномерно, а соединения железа обусловливают неравномерное по спектру отражение почвами солнечного излучения. Очень существенно зависит яркость почв от влажности. В ближнем и среднем инфракрасном участках (0,7–2,5 мкм) яркость почвы в состоянии полной полевой влагоемкости втрое меньше, чем при воздушно-сухом состоянии. Оптические характеристики почв зависят и от гранулометрического состава поверхности: с уменьшением размера частиц коэффициент яркости возрастает экспоненциально.

Класс II – растительные образования – объединяет четыре типа поверхностей: тип 1 – хвойные породы лесных насаждений в зимний период; тип 2 – хвойные породы лесных насаждений в летний период, сухо-дольные луга, травяные породы с недостаточно сочной растительностью; тип 3 – лесные насаждения лиственных пород в летний период, травяные покровы с густой солнечной растительностью; тип 4 – лесные насаждения в период осенней раскраски и созревшие (пожелтевшие) полевые культуры.

Растительность обладает наибольшей по сравнению с другими объектами земной поверхности спектральной селективностью. Отражательные свойства растительного покрова определяются четырьмя основными факторами: оптическими свойствами зеленых листьев, геометрией растений, особенно площадью листовой поверхности, и угловым распределением листьев, а также, если растения не образуют сплошного покрова, то отражательной способностью поверхности почвы и структурой растительного покрова, т. е. характером пространственного распределения растений.

При всем многообразии кривые спектральной яркости зеленых растений имеют одну общую закономерность: в оптическом диапазоне спектра они имеют два минимума – в синем (0,45–0,47 мкм) и красном (0,68–0,69 мкм) участках спектра, и два максимума – в зеленом (0,54–0,58 мкм) и ближнем инфракрасном (0,7–1,3 мкм) участках. Низкая отражательная способность земных растений в красной зоне связана с поглощением, а ее увеличение в зеленой зоне – с отражением этих лучей хлорофиллом. Большие коэффициенты яркости в

инфракрасной зоне объясняются пропусканием этих лучей хлорофиллом и отражением их от внутренних тканей листа.

Класс III – водные поверхности – характеризуется монотонным уменьшением отражательной способности от сине-фиолетовой к красной зоне спектра, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой. Лучи ближнего инфракрасного участка спектра практически полностью поглощаются тонкой пленкой воды, поэтому на снимках в этой съемочной зоне можно дешифрировать только границы и поверхность водных объектов.

Солнечное излучение не только отражается поверхностью воды, но и проникает на глубину, где частично поглощается молекулами воды и растворенными органическими веществами. Проникновение света на глубину спектрально селективно: сине-зеленого света значительно больше, чем красного. При наличии в воде минеральных взвешенных частиц возрастает яркость водной толщи в желто-зеленом участке спектра. Содержащийся в воде фитопланктон вызывает понижение яркости в синей (около 0,4 мкм) и красной (0,64–0,69 мкм) частях спектра, т. е. в полосах поглощения хлорофилла.

Класс IV – снежные поверхности – объединяет два типа: тип 1 – снег, покрытый ледяной коркой; тип 2 – свежевыпавший снег. Данный класс обладает наиболее высокими значениями коэффициентов отражения с небольшим их понижением в ближней инфракрасной зоне спектра. Это понижение резко увеличивается при насыщении снега водой. Близки к этому классу по характеру отражения облачные образования, которые имеют несколько узких полос поглощения в длинноволновой части спектра.

Таким образом, объекты земной поверхности ввиду различной их структуры, физико-химического состава, а также целого ряда других факторов по-разному отражают солнечное излучение в зависимости от длины волны. На этом свойстве основана многозональная съемка, которую выполняют одновременно несколькими объективами, объединенными в одну съемочную систему. Комбинирование различных пленок и фильтров дает возможность получать одновременно несколько черно-белых снимков одного и того же объекта (района), которые в геометрическом отношении являются идентичными, но в яркостном отношении – различными, так как интенсивность излучения заснятых природных объектов отображается дифференцированно в различных спектральных зонах.

Исходя из этого, важным достоинством многозональной съемки является то, что наряду с уже известными дешифровочными признаками объектов, она позволяет использовать дополнительный дешифровочный признак объектов – *спектральный*, т. е. различия их яркости в разных зонах спектра.

1.2.3. Особенности спектрального отражения почвенного покрова и обнажений

Почва отражает падающий на нее световой поток очень слабо. С увеличением длины волны падающего потока энергии увеличивается доля (в процентах) мощности отраженного потока. Наиболее ярко выражена

спектральная характеристика почв в красной части спектра, в ближнем, среднем и тепловом диапазонах инфракрасного излучения. Качественные и количественные различия спектральных характеристик разновидностей почв в этих диапазонах позволяют распознавать их и дешифрировать.

На спектральное отражение, поглощение и излучение почв влияют вещественно обусловленные и вещественно не обусловленные параметры, из которых прежде всего по значимости выделяются: минеральный состав, зернистость (или размер частиц), содержание соединений железа и органических соединений (гумуса), а также структура и выровненность поверхности почв.

Среди вещественно обусловленных параметров минеральный состав, определяющий спектральную характеристику почвы, занимает первое место. Именно свойствами отдельных минералов, влияющих на коэффициенты спектрального отражения и поглощения, определяются спектральная характеристика почвы и величина сигнала.

В отличие от отражательной способности горных пород, на отражение и поглощение энергии падающего светового потока почвами существенно влияют не только их минеральный состав, но и соотношение песчаной и глинистой частей почвы, содержание окислов и гидроокислов железа, вид и количество органического вещества.

Важным параметром является размер частиц почвы (размер зерен минералов), а именно соотношение песчаной и глинистой фракций. Почвы, характеризующиеся пористой, ноздреватой или трещиноватой поверхностью, в значительно большей степени поглощают поток электромагнитного излучения, и соответственно выделяются меньшими отражательными параметрами, чем почвы с плотной поверхностью.

Плотная упаковка тонкозернистых минералов в почве создает относительно ровные поверхности, которые отражают сильнее, чем грубые, шероховатые или неровные поверхности.

Более крупные минералы или частицы почвы неправильной формы, наоборот, создают относительно сложную, неровную шероховатую поверхность почвы. На этих неровностях – в порах и межпоровом пространстве – возникает многократное отражение, что приводит к увеличению поглощения энергии падающего потока излучения и соответственно к уменьшению регистрируемой доли отраженного потока излучения. Это характерно как для целинных (невозделываемых) почв, так и в большей мере для окультуренных почв сельскохозяйственных районов. Здесь структуры и свойства поверхности почв зависят от вида их ежегодного использования. В связи с этим поверхности глинистых или илистых, так же как тонкозернистых, почв будут неровными, если в этих почвах в засушливое время образовались провалы и структуры усыхания, которые соответствующе влияют на процессы отражения и поглощения энергии солнечной радиации.

Интенсивность отражения песков на местности выше, чем почв с высоким содержанием глинистой или илистой фракции. Это становится очевидным даже на аэрофотоснимках, так как пески кажутся всегда светлее, чем глины и богатые глиноземом почвы.

На местности поверхности песчаных почв в сравнении со структурой поверхности размытых и затем высохших глинистых и илистых почв выглядят более гладкими, выровненными. Поэтому пески отражают относительно сильнее, чем неровные поверхности глин и суглинков.

Светло- и темноцветные минералы, в разных количествах входящие в состав почв могут значительно менять их свойства.

Сильно влияют на соотношение отражения и поглощения и на цвет почв содержание в них и вид органического вещества и соединений железа. Свободные окислы железа и его гидроокислы в коротковолновой части видимого диапазона уменьшают, а в длинноволновой и ближней инфракрасной – увеличивают отражательную способность (спектральную яркость) почв. По наблюдениям Обухова и Орлова диапазон 0,5–0,64 мкм имеет особое значение для распознавания Fe-содержащих (прежде всего гётита) почв. Стонер и Баумгарднер установили сильное различие спектрального отражения в ближней и особенно в средних инфракрасных зонах, основанное на содержании железистых соединений в пробах почв, которые использовались для определения стандартной цветности (по Мунселлу) почв в видимом диапазоне. С увеличением содержания окислов железа (особенно гематита) уменьшается отражение.

Уменьшенное содержание гумуса (особенно в пределах от 0 до 8 %) также снижает интенсивность спектрального отражения почв в зоне более 0,6 мкм. Но такое влияние гумуса может уменьшаться высоким содержанием глинистых минералов или глинозема. Содержанием органики, кроме того, определяется способность почв удерживать, накапливать и сохранять влажность. Влажность сама по себе воздействует на характер спектрального отражения (и спектрального излучения) на разных участках почвы. Вид и фракция, а также ионный состав органического вещества в почвах существенно влияют на ее структуру и тем самым на силу ионного обмена в ней. Определение гумусовой фракции в почвах имеет большое значение для оценки возможностей хозяйственного использования почв. Так как гумусовая составляющая почв влияет на их характеристики в некоторых спектральных каналах, то при компьютерной обработке данных мультиспектральных съемок почвенных участков с различным содержанием гумуса была сделана попытка выделить такие участки. Таким образом, была построена карта тестового района с пятью разновидностями (по содержанию гумуса от 1,5 до 7 %) почв. Аналогичные исследования позднее провел Кордсен.

Сильное влияние на спектральные характеристики почвы в видимой и ближней инфракрасной частях оптического диапазона оказывает влажность, т. е. содержание в ней воды. С повышением влажности увеличивается спектральная яркость всех почв независимо от длины волны излучения (как это представлено на рисунках 3–7).

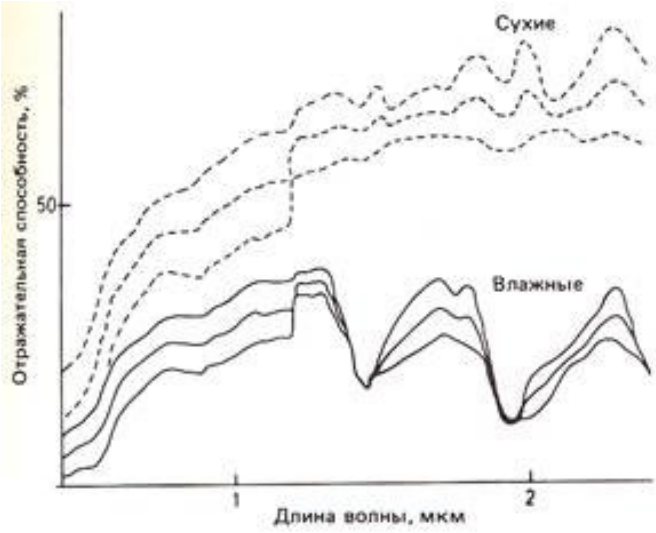

Рисунок 3 – Спектральная отражательная способность сухих и влажных суглинков в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах

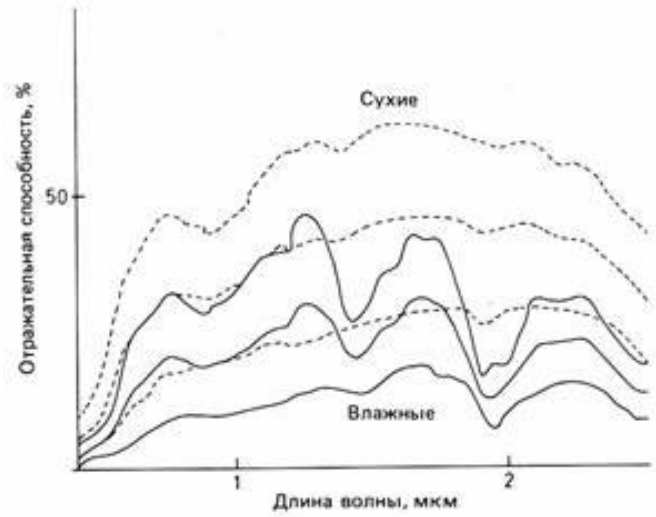

Рисунок 4 – Спектральная отражательная способность сухих и влажных песчаных почв

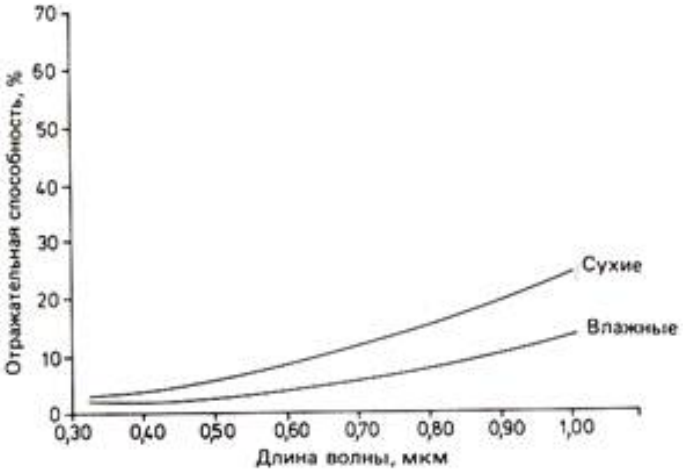

Рисунок 5 – Спектральная отражательная способность чернозема в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах

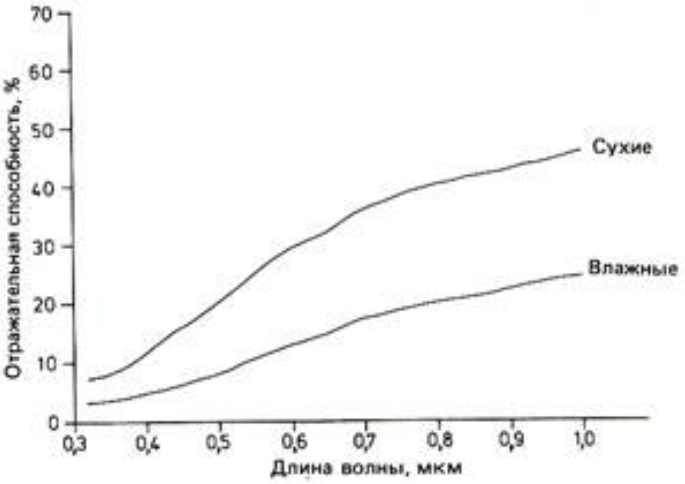

Рисунок 6 – Спектральная отражательная способность илистых почв, в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах

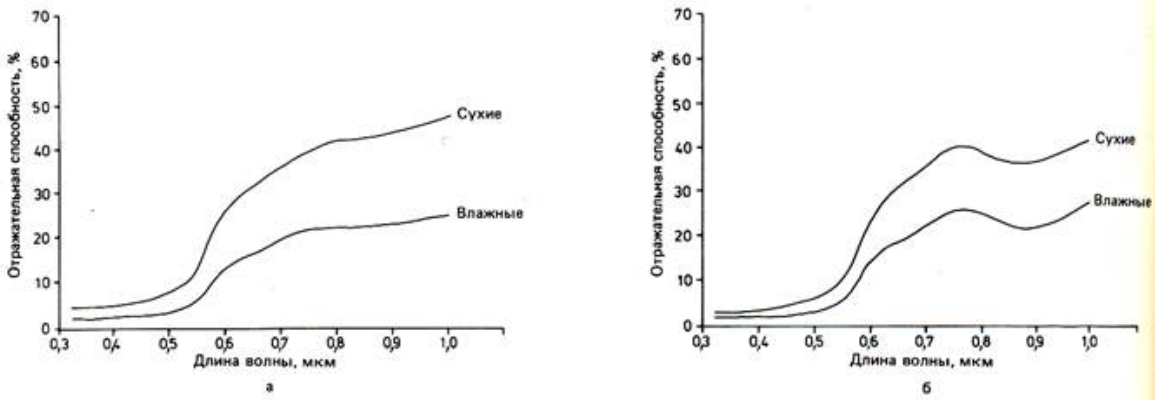

Рисунок 7 – Спектральная отражательная способность (а) красных кварцевых песков и (б) латеритных почв

В сухих почвах пустоты между частицами почвы заполнены воздухом. Для отражения с поверхности сухих почв имеет значение коэффициент преломления на граничной поверхности воздух-частица. Увеличение влажности приводит к заполнению пор водой. Для отражательной способности поверхности влажной почвы важен показатель отражения на граничной поверхности вода-частица. Так как величина такого расчетного показателя на граничной поверхности вода-частица меньше, чем показателя поверхности воздух-частица, то доля отраженной энергии потока излучения с уменьшением содержания воды будет уменьшаться. Влажные и мокрые почвы на многозональных изображениях всегда имеют более темные тона, чем аналогичные сухие почвы.

К независимым от материала (или вещества) параметрам, которые определяют соотношения спектрального отражения и поглощения почвы, относятся: рельеф местности, топографическая позиция почвы, высота над уровнем моря, наклон поверхности почвы и ее ориентировка по отношению к Солнцу, вид и плотность растительности и всевозможные случайные факторы. Вариации этих параметров определяют, какое количество солнечной энергии получит поверхность почвы в течение дня или определенного промежутка дневного времени.

Направление и наклон солнечных лучей к поверхности Земли меняются в течение дня и в зависимости от времени года; соответственно изменяются интенсивность потока солнечной энергии к поверхности Земли и величина спектрального сигнала почвы в определенной ландшафтной зоне. Наконец, ориентировка поверхности по отношению к съемочной аппаратуре, к сенсорам на борту самолета или спутника, и рассеяние света в атмосфере и на окружающих объектах, так же, как и взаимодействие отраженного от поверхности почвы импульса потока энергии с атмосферой, оказывают свое влияние на величину спектрального сигнала, регистрируемого съемочной аппаратурой, и соответственно на яркость изображения объекта на аэрокосмическом снимке.

Рассмотрим результаты специальных фотометрических исследований спектральных характеристик 285 проб почвы из разных районов США. Измерения проводились в лаборатории. Каждый раз измерялись спектральные яркости сухой и влажной пробы. Широта диапазона измерений составляла от 0,32 до 1 мкм, диаметр площадки измерения – около 3 см. Обработка методами математической статистики 160 графиков измерений (кривых спектрального отражения) показала, что по своей форме кривые разделяются на три основные группы по типам почв. Внутри этих групп графики спектрального отражения некоторых типов почв имеют общие тенденции, хотя интенсивность спектрального отражения и уровень мощности отраженного потока могут изменяться от одного типа почв к другому.

К первому типу отнесены черноземы (рисунок 5). Для графиков этого типа характерно, что наклон кривой от начала и до конца остается примерно одинаковым, хотя интенсивность спектрального отражения возрастает с длиной волны излучения. Второй тип почв характеризуется довольно быстрым увеличением интенсивности отражения, особенно в интервале между 0,32 и 0,45 мкм, затем следует в характеризуемых частях спектра выполаживание при повышении положения кривой (рисунок 6). Третий тип представлен двумя графиками интенсивности спектрального отражения красного известковистого кварцевого песчаника и латеритов (рисунок 7). На обоих графиках кривые интенсивности отражательной способности плавно поднимаются от ультрафиолетовой зоны спектра до 0,53 мкм, затем следует четкий перегиб и возрастание до 0,58 мкм, а далее не менее четкое выполаживание кривых. В интервале 0,62–0,74 мкм имеется заметное возрастание отражающей способности, после 0,74 мкм – ее некоторое снижение и далее возрастание интенсивности отражения с длиной волны. На некоторых других семействах кривых этого типа имеется локальный минимум примерно между 0,76 и 0,88 мкм, после которого наклон кривой остается постоянным.

1.2.4. Спектральные коэффициенты яркости растительных сообществ. Особенности спектрального отклика различных видов сельскохозяйственных культур

Спектральные характеристики растений определяются в основном способностью их листвы отражать, поглощать и пропускать солнечную энергию.

Листья имеют достаточно сложное внутреннее строение. На процессы отражения и поглощения солнечной энергии влияют, главным образом, внутренние части листа, а не его поверхность. Поверхность листа почти прозрачна для солнечного излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Только пренебрежимо малая часть потока солнечной энергии отражается от поверхности листьев.

Общая схема взаимодействия падающего потока электромагнитного излучения с живым листом приведена на рисунке 8.

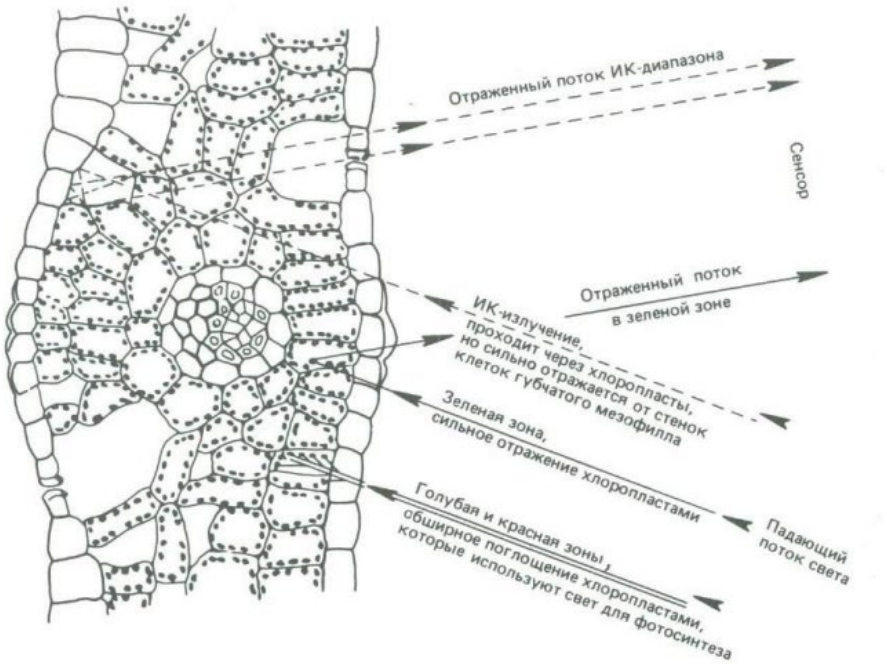

Рисунок 8 – Отражательная, поглотительная и пропускающая способности живого листа для падающего потока излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Как видно из схемы, голубая и красная зоны спектра поглощаются, а зеленая часть спектра отражается хлоропластами, и это определяет зеленый цвет растительности. Инфракрасное излучение проходит через хлоропласт, но сильно отражается от клеток губчатого мезофилла.

Рассмотрим типичный энергетический спектр здоровых листьев в диапазоне 0,4–2,6 мкм. В диапазоне 0,4–0,45 мкм (голубая зона) происходит сильное поглощение излучения хлорофиллом. В интервале 0,48–0,60 мкм отражательная способность листьев значительно выше (зеленый цвет листвы). На участке 0,6–0,7 мкм (красная часть спектра) также, как и в голубой зоне отмечается сильное поглощение электромагнитного излучения хлорофиллом. В ближней инфракрасной области (0,7–1,3 мкм) происходит сильное отражение (30–70 %) излучения поверхностью листа за счет большого градиента свойств границы воздуха и стенки клетки. В более длинноволновой части инфракрасного диапазона 1,3–2,5 мкм кривая спектрального отражения здоровой зеленой

листвы снова снижается. В этой части спектра поток солнечной энергии поглощается содержащей воду мягкой тканью листа. При этом минимумы отражательной способности листвы (1,54 и 1,96 мкм) совпадают с максимумами поглощения излучения водой чистой.

Изучение зависимости между содержанием воды и спектральным отражением на примере листьев маиса (рисунок 9), показало, что падающий поток энергии при незначительной влажности листьев (в первую очередь в среднем отраженном диапазоне инфракрасного излучения) отражается наиболее сильно.

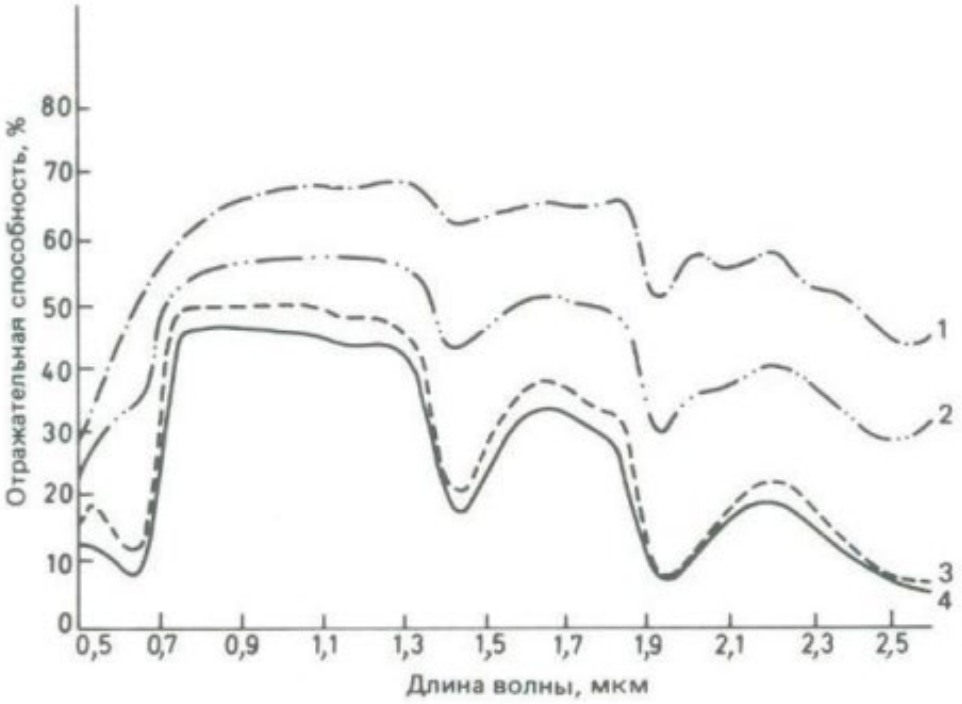

Рисунок 9 – Спектральная отражательная способность листьев с различным содержанием воды (кукурузные листья): 1 – < 40 %; 2 – 40–54 %; 3 – 54–66 %; 4 – > 66 %

И для съемки, и для обработки спектральных данных дистанционного зондирования существенно то, что графики спектрального отражения отдельных типов растительности и различных растительных сообществ имеют свои особенности в определенном интервале длин волн как в положении пика спектра, так и в конфигурации кривой спектрального отражения (рисунок 10).

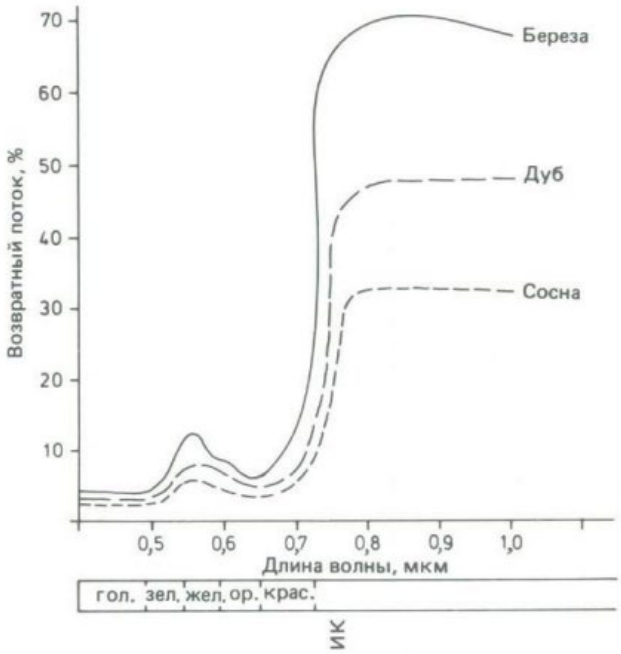

Рисунок 10 – Спектральная отражательная способность сосны, дуба и березы

Эти характерные особенности спектрального отражения позволяют проводить дешифрирование разных видов растительности по данным дистанционного зондирования и в наиболее благоприятных случаях совместно с другими критериями (например, с текстурными особенностями изображения) отождествлять фотообразы растительности с тем или иным ее видом. Здесь, безусловно, необходимо напомнить, что составление карт землепользования, как правило, проводится на аэрофотоснимках крупного масштаба с высоким разрешением (предпочтительно на цветных инфракрасных спектрозональных фотоматериалах). Критериями для обработки в этом случае служат среди прочих кронообразование и высота произрастания разных видов растений.

Развитие и состояние растительности (фитоценозов) определяются значительным рядом факторов: типом почв, характеристикой питательных веществ в почве, характеристикой вод и влажностью, морфологией рельефа, климатическими условиями, ежегодными изменениями и загрязнением окружающей среды, возрастом растительности (фенология) и др. Все эти факторы влияют на развитие и внутреннее строение листа, его размер. Но при этом различные виды и типы растительности реагируют на изменение условий среды по-разному, что неодинаково проявляется в спектре электромагнитных волн.

Контрастно отличаются по своим свойствам здоровые и поврежденные листья (рисунок 11). В видимой части спектра излучения здоровые листья имеют значительно меньшую отражательную способность чем поврежденные, а в ближней инфракрасной области (> 700 мкм) их отражательные свойства резко возрастают и становятся значительно выше, чем свойства поврежденной листвы. Эта увеличивающаяся яркость используется как признак для аномального спектра растительности, который во многих случаях при интерпретации

становится индикатором локальных или региональных заболеваний, или угнетенности растений.

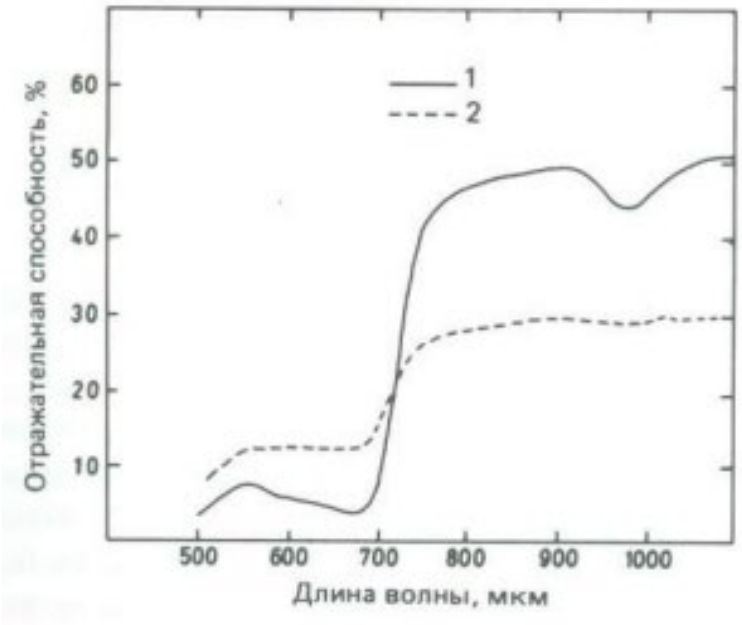

Рисунок 11 – Спектральная отражательная способность здоровых (1) и поврежденных (2) листьев сахарной свеклы

Рассмотрим спектральные характеристики растений, произрастающих на незагрязненных почвах и почвах с высокой концентрацией тяжелых металлов. В обоих примерах отражательная способность угнетенных растений намного сильнее, чем у здоровых деревьев, вероятно, вследствие изменения в строении хлоренхимы.

Качество питательной среды и характер биохимических процессов, идущих в растениях очень сильно, зависят от содержания многих тяжелых металлов в почвах (Mo, Zn, Mn, Pb, Cu, Hg, Cd и др.). Высокое содержание тяжелых металлов в первую очередь влияет на качество питательных растворов, в частности они мешают поглощению основных биофильных элементов: Fe, P, Ca и др., что резко изменяет отражательные свойства листвы. В свою очередь высокое содержание этих металлов в почвах может быть обусловлено высоким их содержанием в подстилающих почвообразующих породах (геохимически специализированные породы, аномальные и рудоносные зоны), а также указывает на возможность применения дистанционных методов исследования растительности как при поисках месторождений полезных ископаемых, так и для оценки масштабов и степени воздействия на окружающую среду промышленных предприятий.

На рисунке 12 показано изменение отражательной способности двух видов сосен, растущих, в одном случае, на почвах с субкларковыми содержаниями молибдена (5–6 г/т) и меди (7–8 г/т), а в другом случае, на почвах с явно аномальными (молибден 225–975 г/т, медь 500–7700 г/т) на уровне их концентраций в рудах или в зонах контрастного техногенного загрязнения. У бальзамовой сосны, растущей на аномальных почвах, отражательная способность значительно выше, чем у деревьев, растущих на нормальных

почвах. У красной сосны также существенно меняется отражательная способность, но в видимой части спектра она выше на аномальных почвах, а в ближнем инфракрасном диапазоне выше на нормальных почвах.

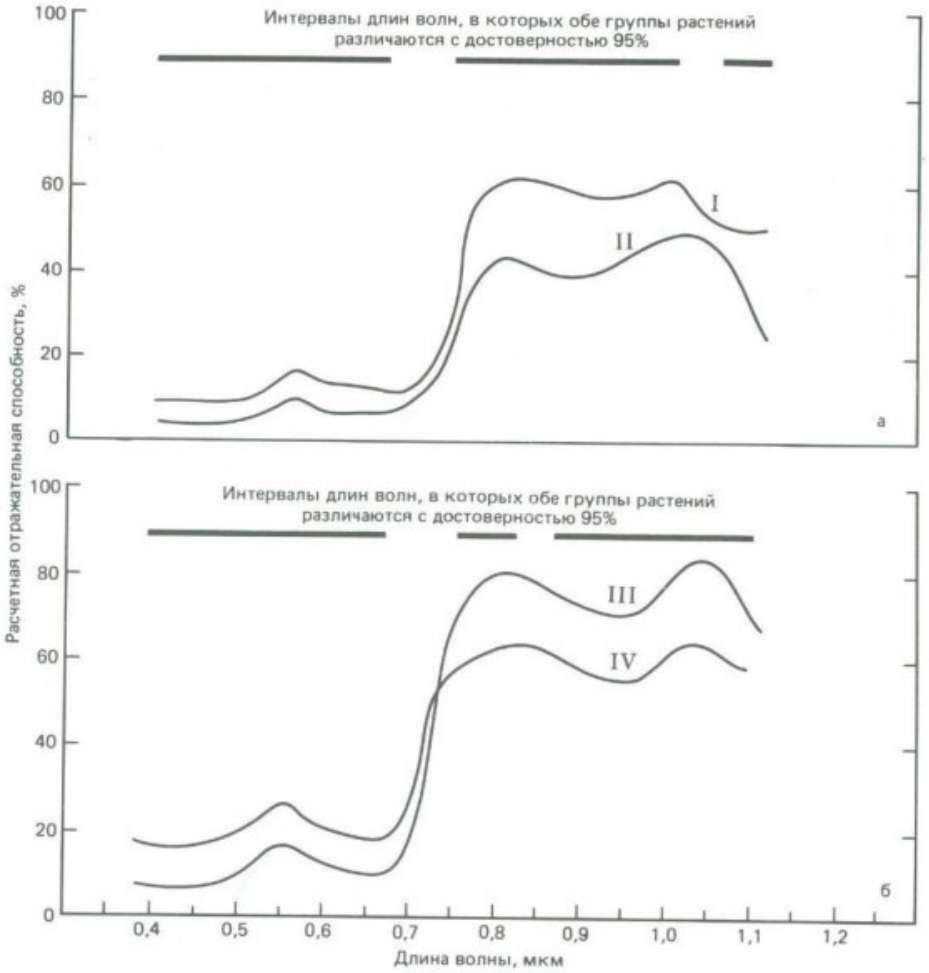

Рисунок 12 – Различия в отражательной способности красной (а) и бальзамовой (б) сосны на почвах с нормальным и повышенным содержанием металлов. Жирной линией обозначены спектральные зоны, важные для дистанционного зондирования (I, IV – аномальная группа; II, III – контрольная группа)

Отражательная способность листьев существенно меняется с возрастом. Молодые листья имеют более высокое отражение в видимом диапазоне, а в ближнем инфракрасном диапазоне более высокой отражательной способностью выделяются зрелые листья (рисунок 13).

Характерные различия в коэффициентах спектров яркостей растений на нормальной и минерализованной почве особенно выделяются при очевидном проявлении старения, т.е. при пожелтении листьев.

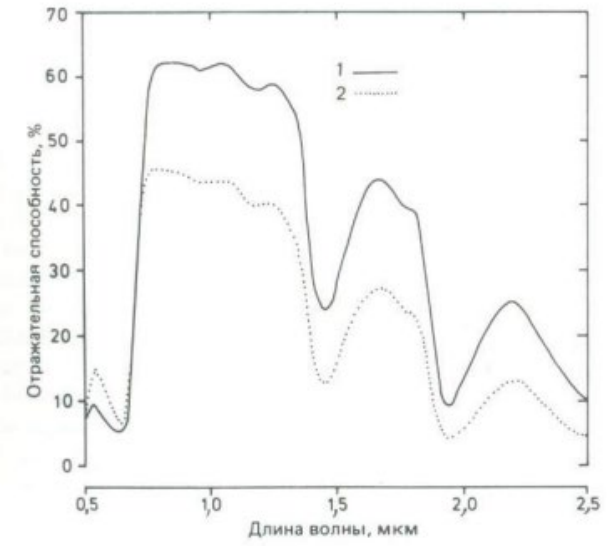

Рисунок 13 – Различие в спектральной отражательной способности зрелых (1) и молодых (2) листьев

Так, например, повышенные концентрации Cu, Zn и Mo в некоторых видах растений обнаруживаются как в начале листообразования, так и во время цветения, а аномальные концентрации Ni, Pb, Cr, Co, Fe, Al, B и Mn появляются в листьях растений только незадолго до пожелтения осенью. Кроме того, поглощение металлов в середине периода вегетации того или иного вида растений меняется и в определенное время мешает поглощению железа и других питательных веществ из почвы.

Геоботанические аномалии, вызванные тяжелыми металлами, локализуются даже на относительно грубых по разрешению изображениях мультиспектрального сканера Landsat, на снимках, сделанных весной в апреле-мае. Спектральные каналы многозонального сканера, снимающего в видимом и среднем (отраженном) инфракрасном диапазонах (как, например, установленные для тематического картирования на спутниках Landsat 4 и Landsat 5 (камера TM), имеют лучшие предпосылки для локализации стрессовых фитоценозов, т.е. сообществ растений, находящихся на угнетенном состоянии.

Как уже описывалось выше, изменения пигмента (хлорофилла) и содержания воды в листве могут вызывать значительные изменения ее спектрального отражения.

Камера TM поставляла соответствующие данные в каналах 3 (0,63–0,69 мкм) и 5 (0,155–1,75 мкм). К моменту установки этой камеры, конечно, еще не было известно, каков физический и химический механизм воздействия металлокомплексов на нормальное развитие растений. Но уже было известно, что зелено-красные (с малым содержанием хлорофилла) листья у растущего растения означают недоразвитость или старение, а также другие признаки ослабления его жизнедеятельности.

Растения, находящиеся в неблагоприятных условиях или больные, часто имеют более мелкие листья, чем здоровые растения того же вида. Поэтому уменьшаются число отражающих поверхностей листвы и толщина лиственного покрова. Добавим к этому, что при замедленном развитии растений и

уменьшении количества листьев сокращаются регистрируемые сенсором теневые участки, так как увеличивается площадь не покрытых листвой поверхностей (стволы, ветви, участки почвы). Это те поверхности, которые в ближнем инфракрасном диапазоне имеют намного меньшую отражательную способность, чем листва. Поток энергии, отражающийся от таких поверхностей, количественно и качественно отличается от потока, отраженного здоровой и сильной растительностью, хотя интенсивность отражения от отдельных листьев может различаться не очень сильно.

Спектральные характеристики многих растений изменяются в течение периода вегетации (рисунок 14).

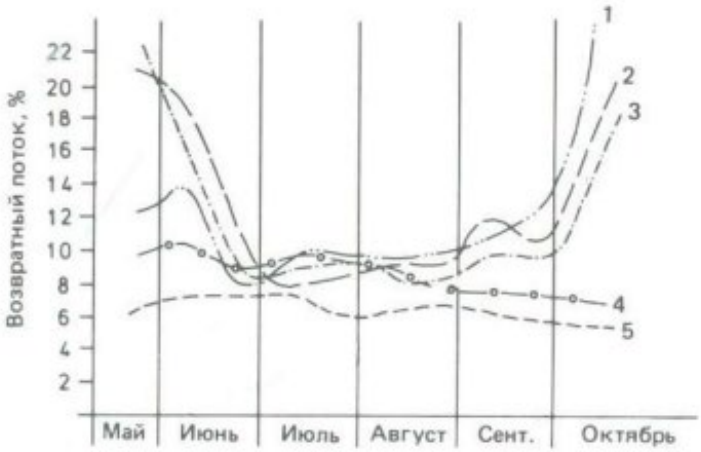

Рисунок 14 – Изменения отражательной способности различных деревьев в течение вегетационного периода: 1 – осина; 2 – дуб; 3 – бук; 4 – сосна обыкновенная; 5 – сосна кедровая

Для развития возможностей дистанционного зондирования при картировании растительности немаловажно, что различия спектральных характеристик определенных растений в одни сезоны года более четкие, чем в другие. Эти времена года больше подходят для съемок, чем другие, в которые интенсивность отражения различными видами растений различается мало.

В целом изменения спектральных характеристик у лиственных деревьев в вегетационный период выражены более четко, чем у хвойных (рисунок 14). Последние поглощают солнечную энергию в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах сильнее других растений. Для видимого, светового излучения это поглощение составляет около 95 %, а для инфракрасного – примерно 65 %. В процессе старения листвы происходят изменение ее пигментации, уменьшение содержания воды и в конечном итоге разрушение мезофилла. Благодаря распаду хлорофиллового пигмента, снижается прежде всего поглощение светового потока в красной и отражение в зеленой частях спектра. В голубой части спектра абсорбция продолжается благодаря другим пигментам листа. В результате этих процессов листья приобретают осенью желтый или красный цвет. Благодаря обезвоживанию листьев в процессе старения и разрушению оболочек клеток мезофилла влажность листьев уменьшается, и солнечное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне отражается сильнее.

Спектральные свойства групп кустарника или деревьев в целом сопоставимы со спектральными характеристиками листвы того вида растений, из которого состоит эта группа кустарников или деревьев. Но есть и различия, т.к. в группах деревьев влияет отражение и нижних листьев.

Во многих случаях верхние листья растительного покрова (в том числе и крон) пропускают большую часть падающего потока ближнего инфракрасного излучения и только потом он отражается от нижних листьев крон. Эта проникшая в нижний слой листвы часть инфракрасного потока излучения еще раз пройдет через верхний слой листьев в шатре крон и усилит отражательную способность растительного покрова в ближнем инфракрасном диапазоне по сравнению со спектральной яркостью единичных листьев того вида, кроны которых его образуют. В этом процессе очень существенна относительно высокая проницаемость листьев для инфракрасного излучения. Анализ математической модели прохождения потока солнечной радиации через сплошной растительный покров показал, что спектральное отражение и проницаемость покрова можно рассматривать как функцию от суммарной поверхности листьев, коэффициента абсорбции, коэффициента рассеяния и отражательной способности нижележащего субстрата. Эти коэффициенты находятся в зависимости от геометрии растительного покрова и оптических свойств его листьев. Усиление отражения от сплошного покрова крон в ближнем инфракрасном диапазоне многократно повторяющимся отражением или рассеянием от разно расположенных и разно ориентированных к потоку энергии листьев увеличивает и без того сильное различие в спектральном отражении потока солнечной радиации в видимом и в ближнем инфракрасном диапазонах. Этим разрывом в интенсивности спектрального отражения, т.е. скачком спектральных яркостей, можно воспользоваться для определения изменений плотности или густоты растительного покрова и в лучшем случае для определений видового состава растений на изображениях со спутника Landsat. Соотношение интенсивности отражения растительных сообществ между каналами 5 и 6 мультиспектрального сканера изменяются в зависимости от плотности растительности. Если плотность растений увеличивается, то получается уменьшение спектральной яркости в канале 5 (0,6–0,7 мкм) вследствие сильного поглощения хлорофиллом и увеличение отражения кронами растений в канале 6 (0,7–0,8 мкм) из-за сильного рассеяния в этом интервале длин волн. Проблема качественной и прежде всего количественной обработки спектральных данных о растительных сообществах заключается в том, что взаимодействие между потоком солнечного излучения и зарослями кустарника или лесом очень сложно. На спектральные характеристики отражения растительностью, если это сплошной покров крон, влияют следующие факторы: отражательная способность и «прозрачность» (проницаемость) отдельных листьев растительного покрова; порядок размерности поверхности листьев, оцененный в целом в связи с этим взаимодействием; расположение листьев по отношению к общей поверхности растительного покрова и по вертикали, вдоль стволов, деревьев или кустарников; способность и характер отражения и пропускания потока излучения различными

частями кроны и ствола; отражательные свойства подлеска на разных по высоте уровнях (кустарниковые заросли, травы, мхи, лиственный покров почвы, ее тип, состав, влажность, мощность, горные породы субстрата, наконец, общая влажность поверхности почвы); стояние Солнца (высота и азимут, меняющиеся в течение суток и года), а также направление и высота съемки. Все эти факторы могут изменяться не только от одного района съемки к другому, но и в пределах одного снимка. Мешает изучению и классификации объектов прежде всего существование разных видов теней, что наблюдается даже в одинаковых условиях съемки, а тем более в разные периоды наблюдений. (Это относится и к аэрокосмическим съемкам.) Если к этому еще присовокупить ожидаемые ежегодные изменения спектральных характеристик растительного покрова в период вегетации, то, без всяких сомнений, составление видового каталога спектральных характеристик растительности или отождествление того или иного вида по спектральному сигналу представляет значительные трудности. Ведь даже в растениях одного вида может меняться характер их развития и физиологического состояния в зависимости от климатической зональности Земли и микроклимата региона, особенно если эти различия относятся к освещенности солнцем в течение дня и отражаются на их развитии. Из всего вышеизложенного опять приходим к выводу о преобладающей роли локальных факторов, таких, как положение на местности и освещенность и совпадение признаков одного вида с признаками других видов растительности.

Растения поглощают огромное количество энергии потока солнечной радиации, прежде всего в видимой части спектра и излучают значительную часть полученной энергии в тепловом инфракрасном диапазоне. Этот процесс способствует сохранению энергии растений и их приспособлению к изменяющимся условиям окружающей среды в суточном и годовом циклах. Вместе с тем для излучения с длиной волны более 2 мкм листва обладает высокой абсорбционной способностью. Во всяком случае в этом спектральном диапазоне только относительно небольшой части потока солнечного излучения удается достичь поверхности Земли.

Высокая излучательная способность листьев в тепловом инфракрасном диапазоне представляет интерес для дистанционного зондирования. Поэтому, для дистан-ционного зондирования растительности в инфракрасной области используются диапазоны 3–5,5 мкм и 8–14 мкм, которые соответствуют окнам пропускания атмосферы.

Температурные характеристики растений определяются главным образом транспирацией (выделение нижней частью листьев водяного пара). Транспирация в свою очередь определяется отношением корневой части к побегам, площадью поверхности и структурой листьев, а также характером геологическо-го субстрата, обводненностью почв и др.

Съемки в тепловом инфракрасном диапазоне позволяют идентифицировать виды растений только в исключительных случаях, когда их результат корректируется калибровочными данными района съемки, т.е. проводятся соответствующие синхронные наземные измерения.

И все же, если имеются результаты синхронной многозональной съемки в видимом и инфракрасных диапазонах, можно по относительным различиям в спектральных яркостях объектов различить залесенные и безлесные участки, участки, заросшие кустарником, и т. п.

Основной задачей аэрокосмического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур является идентификация видового состава и морфофизиологических изменений разных типов растительности в агроценозах.

Важным элементом развития современных аэрокосмических систем мониторинга представляется наличие наземной спектральной информации о сезонном изменении состояния растительности, позволяющей проводить точную верификацию результатов аэрокосмических съёмок.

Знания о связи структуры и состояния растительности с её спектральными отражательными способностями лежат в основе решения тематических задач сельского хозяйства. Решение таких задач достигается путём систематических повторных съёмок, которые обеспечивают наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур в течение периода вегетации Использование различий в спектральных яркостях разных типов растительности даёт возможность выявлять степень их поражения патогенами, прогнозировать урожайность и другие параметры.

Экспериментальные опыты Ю. К. Росса, Н. Н. Выгодской, И. И. Горшковой, В. Г. Кастрова и др. показали: отражательные свойства растительного покрова зависят от целого набора биометрических параметров, что затрудняет их корректное определение и усложняет систематизацию эмпирических зависимостей. В их работах отмечается, что при изучении спектральной отражательной способности растительного покрова необходимо учитывать и спектральную отражательную способность почв, так как оба объекта являются «ламбертовыми рассеивателями». В их работах так же отмечается, что спектр отражения растительного покрова зависит от массы наземной растительности на единицу поверхности почвы.

Спектрометрирование участков озимой пшеницы с различной величиной биомассы показало, что при относительно небольшом количестве зеленой массы кривые отражения системы почва-растительность имеют тот же характер, что и кривые отражения почвы. По мере увеличения биомассы форма кривых постепенно приобретает вид, характерный для зеленой растительности.

Отражательные характеристики системы почва-растительность зависят от условий освещения и наблюдения, а также от соотношения между освещенностью прямым и диффузными солнечными потоками.

Изучение влияния степени увлажнения почв на спектральную отражательную способность ячменя производилось как в полевых, на территории ключевого участка «Щомыслица», так и в камеральных условиях, на технической базе НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ, в ясную безоблачную погоду. Так как лабораторные исследования производились раньше, то результаты измерений сильно отличаются от результатов полевого спектрометрирования.

Как мы видим из лабораторных исследований, спектральная отражательная способность ячменя, произрастающего на дерново-подзолистых автоморфных почвах в зоне фотосинтетически активной радиации куда выше, чем у ячменя на временно-избыточно увлажненных и глееватых почвах (рисунок 15). Это можно объяснить тем, что в момент отбора образцов (начало июля) ячмень был в фенологической фазе колошения и его спектральная отражательная способность зависела от влияния влажности подстилаемых его почв. На временно-избыточно увлажненных и глееватых почвах ячмень созревал куда дольше и медленнее из-за избыточного увлажнения земной поверхности. Следовательно, у ячменя, произрастающего на автоморфных почвах, практически полностью исчез хлорофилл и растение приобрело характерный желтый оттенок. Ячмень, произрастающий на дерново-подзолистых временно-избыточно увлажненных почвах, имеет характерную полосу поглощения хлорофилла в районе 430–450 нм, но в области 660–640 нм он эту полосу теряет. Кривая спектральной яркости ячменя, произрастающего на глееватых почвах, имеет форму, близкую к кривой спектральной яркости зеленой растительности с характерными полосами поглощения хлорофилла в районе красной и синей зоны спектра. В ближней инфракрасной зоне спектра спектральная отражательная способность выше у ячменя, произрастающего на глееватых почвах, т.к. он имеет более сложную мезофильную структуру, чем ячмень, произрастающий на временно-избыточно увлажненных и автоморфных почвах.

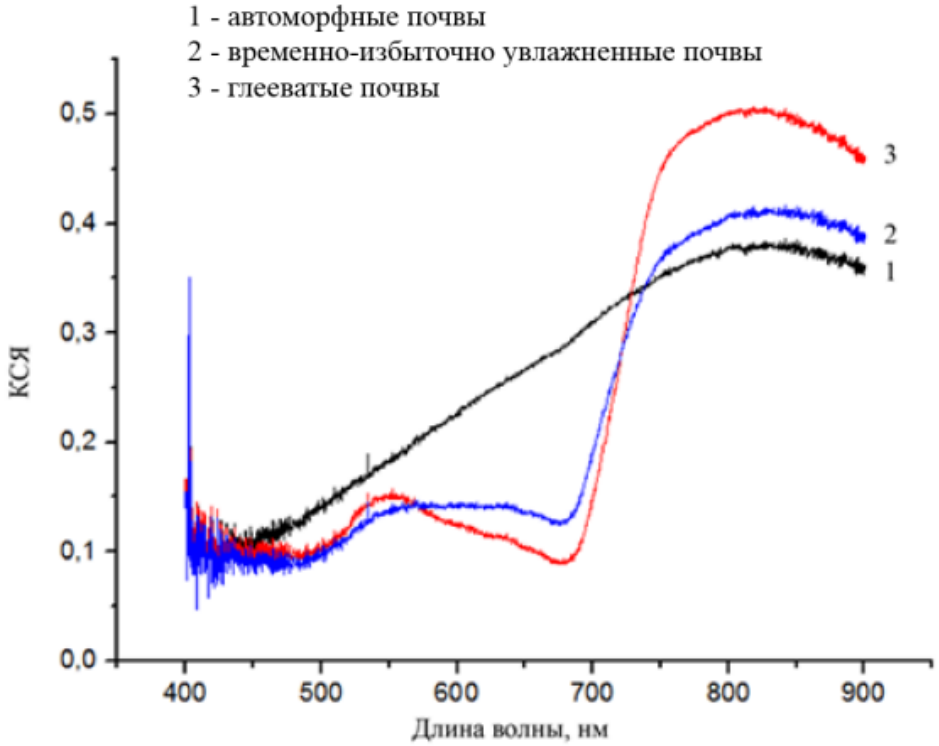

Рисунок 15 – Кривые спектральной яркости ячменя в фенологическую фазу колошения на почвах разной степени увлажнения

Результаты полевого спектрометрирования (рисунок 16) дают другую картину, так как исследования проводились в конце июля и ячмень уже был в стадии созревания. Так же в лабораторных исследованиях спектрометрическая съемка проводилась без учета влияния атмосферы.

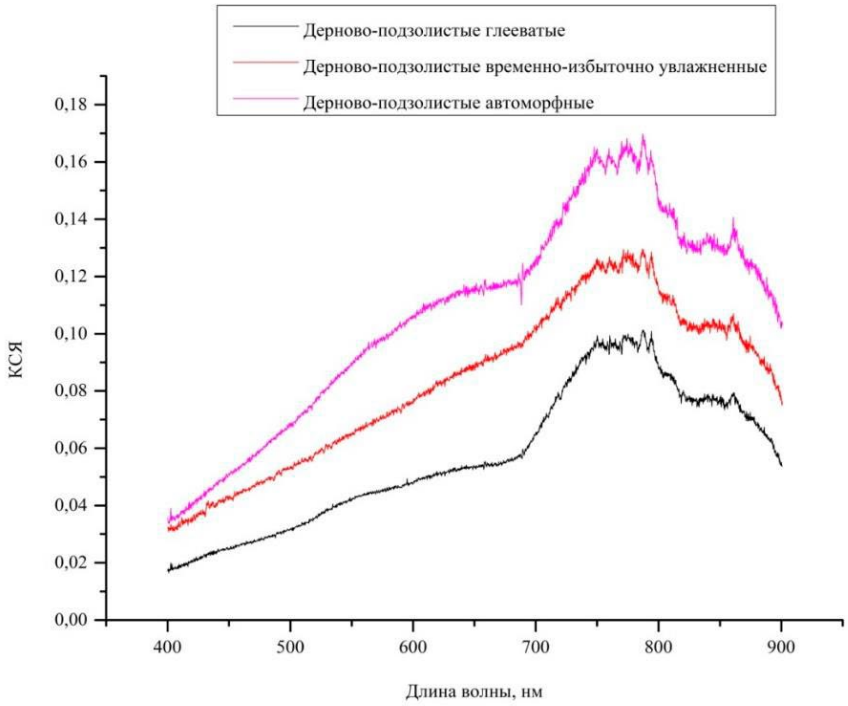

Рисунок 16 – Кривые спектральной яркости ячменя в фенологическую фазу созревания на почвах различной степени увлажнения

С использованием многозональных снимков Sentinel 2 на территорию ключевого участка была получена карта нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Анализ изображения, почвенной карты и карты NDVI показал, что растительность визуально на космическом снимке в период созревания дифференцируется недостаточно. Однако контуры вегетационных индексов со значениями от −0.1 до 0.4 согласуются с отдельными контурами ячменя на почвах с различной степенью увлажнения.

Для автоморфных почв соответствует вегетационный индекс −0.1, временно-избыточно увлажненных – 0.15 и глееватых – 0.6 (рисунок 17).

При проведении спектрометрических измерений рапс был в фенологической фазе формирования стручков. Измерение на каждой точке производилось в десятиразовой повторности, для дальнейшего усреднения результатов и исключения возможных артефактов. В результате обработки измерений были построены кривые спектральной яркости (рисунок 18).

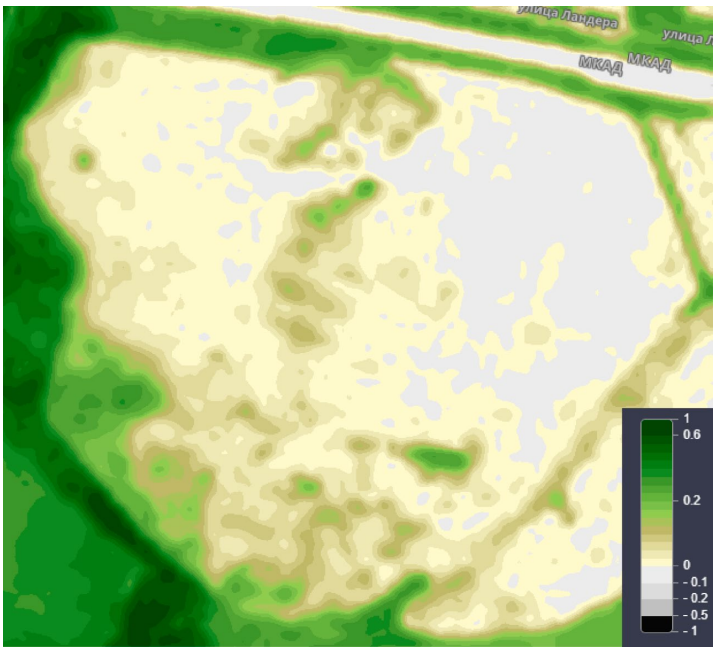

Рисунок 17 – Цветокодированное изображение NDVI

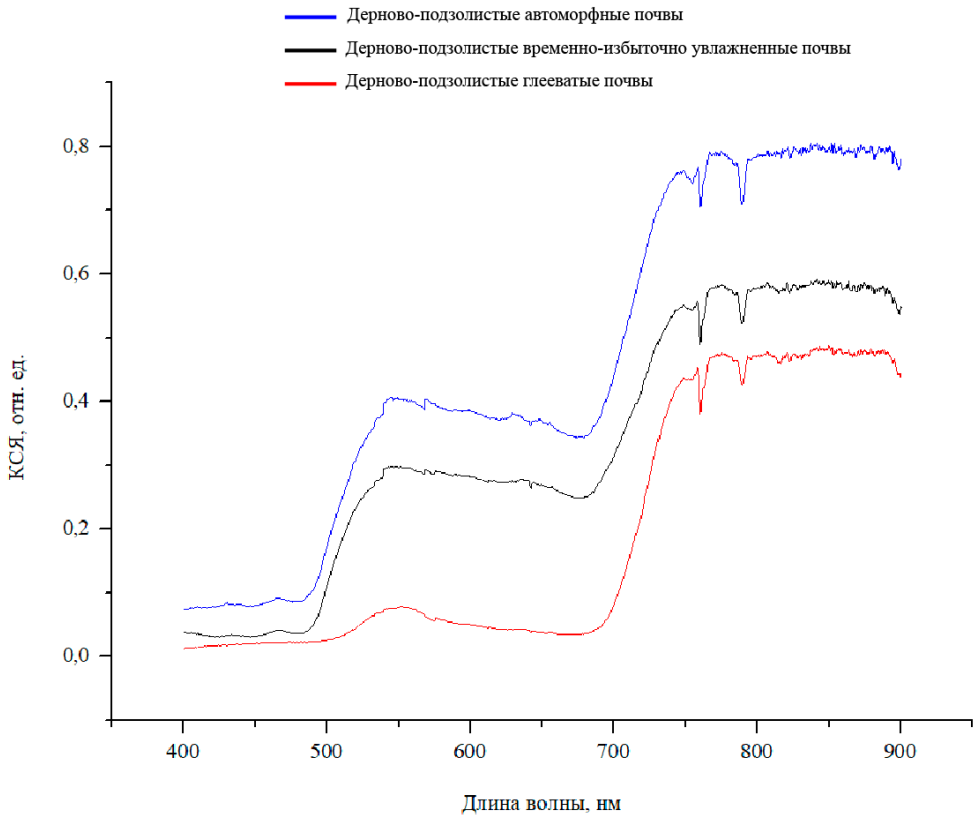

Рисунок 18 – Кривые спектральной яркости рапса в фенологическую фазу формирования стручков на почвах различной степени увлажнения

Значения коэффициента отражения рапса тесно коррелирует со значением влажности почв. Из кривых спектральной яркости и сводной таблицы видно, что рапс, произрастающий на автоморфных почвах, имеет спектральную отражательную способность выше, чем рапс, произрастающий на временно-избыточно увлажненных и глееватых почвах. Наименьшую спектральную отражательную способность имеет рапс, произрастающий на глееватых почвах.

По данным многозональной съемки Landsat8 OLI было получено цветокодированное изображение нормализованного вегетационного индекса NDVI, иллюстрирующее фенологическую фазу рапса. Анализ изображения, почвенной карты и карты NDVI показал, что растительность визуально на космическом снимке в период формирования стручков практически не дифференцируется. В отличие от контуров вегетационного индекса ячменя, контуры рапса практически не выделяются.

На космическом снимке ложбинообразные понижения с слабоглееватыми почвами изображаются серым тоном изображения, а глееватые, приуроченные к замкнутым понижениям – темно-серым. Это объясняется тем, что на повышенных элементах рельефа созревание сельскохозяйственных культур происходит раньше, чем на пониженных с переувлажненными почвами. Соответственно изменяется и окраска растений, что в свою очередь влияет на их спектральную отражательную способность.

Изменение спектральной отражательной способности зерновых культур и тона изображения в фенофазу созревания, позволяет дешифрировать почвы в зависимости от степени увлажнения.

Полевые и лабораторные спектрометрические измерения согласуются с уже проведенными до этого исследованиями зарубежных и отечественных специалистов. Значения коэффициента отражения ячменя и рапса тесно коррелирует со степенью увлажнения почв. Было подтверждено и то, что лабораторные измерения могут проводится для исследования спектральной отражательной способности не только почв, но и сельскохозяйственных культур. Преимуществом лабораторных измерений является независимость их от погодных условий. Так же они менее трудоемки и затратны, чем полевые исследования.

1.2.6. Спектрально-отражательные свойства водных объектов

Спектральные характеристики воды, так же, как и спектральные характеристики растительности и почвы, изменяются с длиной волны, в соответствии с имеющим место взаимодействием энергии и вещества.

Что касается поверхности воды, то здесь эти взаимодействия вызваны природой самой воды; кроме того, на них влияют различия в состоянии воды. Как известно, определить водную поверхность и установить границы масс воды с помощью дистанционного зондирования очень легко на изображениях в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, хотя некоторые аспекты состояния воды лучше всего определяются с использованием данных, полученных в видимом диапазоне. Картографирование размеров и состояния снежного покрова для лучшего предсказания стока пакового снега наилучшим образом может быть выполнено в среднем инфракрасном диапазоне.

Рассмотрим, прежде всего, ближний и средний инфракрасный диапазоны, где даже очень тонкий слой воды (в жидком состоянии) имеет несколько отчетливых сильных полос поглощения. В естественных условиях поверхностью воды поглощается почти вся падающая энергия в ближнем и среднем

инфракрасном диапазонах длин волн, даже если слой воды небольшой. Вследствие такого сильного поглощения энергии водой в этих диапазонах может быть отражено лишь очень небольшое количество энергии. Это очень выгодно для дистанционного исследования, поэтому отражательная способность воды в отражательном инфракрасном диапазоне спектра четко выражена и гораздо ниже, чем отражательная способность растительности или почвы. Четкие различия отражательной способности в инфракрасном диапазоне делают возможными простую идентификацию и картографирование водных поверхностей. Например, на черно-белых инфракрасных аэрофотоснимках или многоспектральных сканерных изображениях в отражательном инфракрасном диапазоне спектра вода черного цвета и хорошо отличается от окружающих ее растительности и почвы. Специалисты, работающие с данными Ландсат, утверждают, что определить местонахождение даже очень маленьких прудов или озер (площадью 2— 4 га) можно очень быстро и легко.

Необходимо отметить, что почти во всех случаях, когда есть различия в состоянии воды, между спектральными характеристиками, измеренными системами дистанционного зондирования, и данными, определяемыми характеристиками воды, существуют сложные взаимосвязи. Если нет соответствующих справочных данных, трудно правильно интерпретировать полученные с помощью дистанционного зондирования измерения отражательной способности в таких областях. Однако не следует недооценивать тот факт, что методы дистанционного исследования могут принести большую пользу при простом обнаружении областей с различными спектральными характеристиками и количественном определении и картографировании таких областей, даже если точную причину различий нельзя определить только из измерений спектральных характеристик.

Теперь давайте рассмотрим спектральные характеристики воды в замерзшем состоянии, т. е. снега. Возможность получения данных об отражательной способности с высоты полета спутника представляла особый интерес для гидрологов, работающих над предсказанием стока пакового снега во многих горных областях мира. То, что спутники могут быстро получать данные по большим географическим областям и через очень короткие промежутки времени, предоставляет возможности, которых ранее не существовало. В прошлом предсказание стока выполнялось с помощью наземных измерений глубины и содержания воды в паковом снеге для многих пунктов или полетов на небольшом самолете для определения размеров области снежного покрова. Однако тогда не было экономичного и быстрого метода для получения точных оценок области снежного покрова. Эта задача идеально решается спутниковыми системами сбора данных и методами машинной обработки.

В самом начале работы со спутниковыми данными стало ясно, что надежное картографирование снега невозможно, потому что спектральные характеристики снега и облаков похожи. Это сходство было особенно очевидным для исследователей, работающих с данными Ландсат 1, которые установили, что спектральные характеристики облаков и снега настолько одинаковы в диапазоне чувствительности детекторов Ландсат 1 (0,5—1,1 мкм), что спектрально

отличить области снежного покрова от облаков нельзя. Было также обнаружено, что во многих случаях отражательная способность как снега, так и облаков настолько высока, что детекторы спутника насыщаются; таким образом, даже если различия спектральных характеристик действительно существуют, их нельзя измерить.

1.2.7. Изменчивость спектральных коэффициентов яркости элементов ландшафта

Изучение оптических свойств ландшафта имеет более чем полувековую историю. Необходимость детального исследования этих свойств была вызвана широким развитием в 30-х годах нашего столетия работ по аэрофотосъемке. Первые же попытки дешифрирования аэрофотоснимков привели к изучению отражательных свойств природных объектов. Поэтому в работах по аэрофотосъемке появились публикации по спектральной отражательной способности природных объектов, среди которых особо следует отметить исследования Е.Л. Кринова.

Интересно то, что в развитии оптики ландшафта существенная роль принадлежит астрофизикам. В связи с поисками жизни на других планетах, в частности на Марсе, возникла необходимость исследования оптических свойств растений и особенно растений, живущих в экстремальных условиях, что привело к рождению и развитию специального направления – астроботаники.

В.В. Шаронов впервые сформулировал основные задачи, стоящие перед этой дисциплиной:

1) изучение оптических свойств атмосферы и анализ условий освещения ландшафта;

2) исследование процессов взаимодействия потока солнечной радиации с компонентами ландшафта. Однако, как правильно отмечает Ю.С. Точельников, атмосфера и происходящие в ней оптические явления лишь в ограниченной мере связаны с расположенной под ней местностью и является предметом специальной научной дисциплины, называемой атмосферной оптикой.

Наиболее детальные исследования оптических свойств ландшафта провел Ю.С. Точельников, который оптику ландшафта рассматривает как учение о взаимодействии солнечного излучения с геосистемами суши и считает, что в задачу этой дисциплины входит изучение оптических характеристик компонентов и элементов ландшафта и их динамики, а также выявление факторов, влияющих на эти характеристики.

Рассмотрим основные положения оптики ландшафта в том понимании, как они представляются Ю.С. Точельникову.

Как известно, отражательную способность объектов характеризует совокупность нескольких параметров. Из них прежде всего следует отметить коэффициент полного отражения, или альбедо. Обычно исследователь наблюдает лучистый поток, отраженный в некотором фиксированном направлении, и по нему судит о яркости объекта, которая зависит от освещенности и способности отражать свет в данном направлении. Последняя

характеризуется посредством коэффициента яркости, представляющего собой отношение яркости объекта в данном направлении к яркости идеальной рассеивающей поверхности, имеющей коэффициент отражения, равный единице, и находящейся в тех же условиях освещения и наблюдения.

Так как природные объекты в общем случае обладают избирательным поглощением, то отраженное от них излучение спектрально селективно. Спектральную отражательную способность объектов описывают набором коэффициентов спектральной яркости, которые определяют из отношения спектральных яркостей объекта и идеально рассеивающей поверхности, находящихся в одинаковых условиях освещения и наблюдения.

Природно-территориальные комплексы, слагаемые множеством геомасс и их элементов, различных по размерам, форме, ориентации и оптическим особенностям, имеют сложную структуру и текстуру. Поэтому реально наблюдаемые цвет и яркость ПТК, равно как и его оптические характеристики, всегда являются некоторыми средними величинами, складывающимися из сочетания весьма разнообразных значений характеристик разнородных мелких деталей.

По мере удаления наблюдателя от объекта, т.е. по мере увеличения размеров фотометрируемой площадки, интегрируются оптические характеристики все большего числа деталей поверхности исследуемого элемента ландшафта. В связи с этим В. В. Шароновым было введено понятие «референц-поверхности», или «поверхности отнесения», т. е. поверхности, к которой условно относят фотометрические характеристики. Референц-поверхность проходит через средний уровень вершин деталей иссеченных объектов и ограничивается полем зрения прибора. Различают три порядка референц-поверхности: первый порядок, соответствующий отдельным элементам геомасс; второй порядок, соответствующий парцеллам, и третий порядок, который присущ фации. При характеристике спектрофотометрических показателей необходимо учитывать порядок референц-поверхностей.

Методика изучения оптических характеристик ландшафта хорошо разработана. Имеется специальная фотометрическая аппаратура, позволяющая изучать спектральную яркость природных образований. Полевой спектрофотометр – основной прибор при подобных исследованиях, измеряющий коэффициенты спектральной яркости объектов в отдельных точках рабочего диапазона спектра (400–900 нм), со спектральным разрешением 10–20 нм. Кроме него применяются аэроспектрометры, устанавливаемые на летательных аппаратах, телефотометры, отличающиеся от предыдущих приборов тем, что яркость регистрируется не в одном канале, а сразу же в нескольких. Кроме того, применяется специальная аппаратура, устанавливаемая на космических летательных аппаратах.

С помощью методики спектрофотометрических исследований можно решить следующие задачи:

1. Получение оптических характеристик отдельных элементов геомасс, имеющих размер 0,2–1,5 м.

2. Выявление оптических характеристик элементов внутренней структуры фации и оценка их геометрических характеристик.

3. Измерение оптических характеристик фаций и выявление их геометрических характеристик.

4. Картографирование ландшафта по оптическим характеристикам.

Вкратце рассмотрим оптические свойства отдельных геомасс и компонентов, слагающих ландшафт.

Принято считать, что оптические свойства растений обусловливаются составом пигментов, составом и состоянием растительных тканей, морфологией отдельных органов растений, а также растений в целом, их возрастом и принадлежностью к экологической группе.

С ландшафтно-геофизических позиций оптические свойства растений довольно полно описываются спектральной отражательной способностью слагающих эти растения геомасс.

Спектральные кривые отражения и пропускания подобны и имеют ход, обратный поглощению. Это объясняется тем, что отражение происходит не только от поверхности, но и от внутренних слоев листа. В результате в отражающем потоке присутствует составляющая, прошедшая через толщину листа. Кривые спектральной яркости могут значительно отличаться у различных растений с неодинаковыми видами фотосинтезирующих фитомасс.

Рельеф оказывает существенное влияние на оптические свойства ПТК. Так, особенности изображения элементов горных ландшафтов на аэрофотоснимках определяются не только их коэффициентами спектральной яркости, но также и ориентированностью склонов по отношению к солнечным лучам, так как в зависимости от последней изменяются уровень освещенности склонов и ее спектральный состав.

В оптике ландшафта детально исследованы спектральные характеристики природно-территориальных комплексов полярного, бореального и суббореального поясов, а также динамика оптических характеристик ландшафта.

1.3. Методология наземного спектрометрирования

1.3.1. Введение в наземные, воздушные и космические методы спектрометрирования

Основной путь изучения спектральной отражательной способности – экспериментальный. Спектральные яркости или коэффициенты спектральной яркости и индикатрисы отражения получают на основе абсолютных или относительных измерений, выполняемых с помощью фотоэлектрических спектрометров.

Помимо измерения излучения от исследуемого объекта необходимо также зарегистрировать излучение от эталона; при этом объект и эталон должны находиться при одинаковых условиях освещения. В качестве эталона применяют материалы с хорошо известными и стабильными во времени оптическими характеристиками (гипсовые пластинки, молочные стекла).

Спектрометрические измерения, которые выполняют с точностью 5–10%, могут быть лабораторными, полевыми, самолетными и космическими.

Лабораторные спектрометрические измерения небольших по размеру образцов выполняют для выявления зависимости отражательной способности, например, почвы от содержания гумуса, механического состава, влажности и т.д.

Полевое спектрометрирование проводится в целях определения спектральных коэффициентов яркости и индикатрис отражения отдельных объектов и геосистем низших рангов. В полевых условиях изучают суточную и сезонную динамику отражательной способности природных объектов, влияние погодных условий (дождь, ветер и т.д.) и условий наблюдения (положение Солнца, угол визирования).

Аэроспектрометрирование выполняется с самолета или вертолета для изучения более крупных и менее однородных объектов — сельскохозяйственных полей (угодий), водоемов и т.д.

Принципиальная особенность космического спектрометрирования заключается в том, что спектрометр, установленный на космическом аппарате, регистрирует суммарное излучение земной поверхности и атмосферы. Поэтому одной из задач космического спектрометрирования является изучение влияния атмосферы на оптические характеристики земных объектов.

При практическом использовании результатов спектрометрирования необходимо учитывать, что отражательная способность, например отдельного древесного листа (лабораторные измерения), отличается от отражательной способности дерева (наземные измерения), а она, в свою очередь, — от отражательной способности участка леса (самолетные измерения) или лесного массива (космические измерения).

Также в качестве эталонных поверхностей обычно используются экраны, покрытые окисью магния или сульфатом бария, гипс, баритовая бумага, молочное или матовое стекло и т.д. Наиболее близким по своим оптическим свойствам к идеальной ортотропной поверхности является покрытие из окиси магния (MgO), нанесенное на пластину из светлого материала посредством сжигания чистого Mg. Однако сложная технология, плохие механические свойства и т.п. обусловили применение такого типа экранов только в лабораторных условиях.

Значения коэффициентов спектральной яркости для различных длин волн представляют в форме графика – кривой спектральной яркости. Каждому объекту соответствует свой собственный «спектральный образ», для получения которого нужно провести очень точные измерения отражательной радиации в различных частях спектра электромагнитных колебаний.

Совокупность коэффициентов интегральной яркости по разным направлениям изображают графически в виде полярной диаграммы – индикатрисы отражения.

1.3.2. Специфика наземных наблюдений за спектральными характеристиками ПТК

На «наземном» уровне проводится выбор и описание тестовых объектов спектрометрирования с учетом особенностей траектории системы космического базирования, для которой планируется проведение летных калибровок. Для протяженных запланированных к многоуровневой съемке калибровочных площадок (тестовых объектов) подробно описывается ландшафтная, геоморфологическая структура, а также процентный состав произрастающей на ней растительности и прочие особенности. Определяются точки измерений, количество и расположение которых устанавливается исходя из визуальной оценки степени однородности объекта (чем однороднее объект, тем меньше может быть количество тестовых участков на нем). Далее проводится измерение спектральных отражательных характеристик в соответствии с методиками, разработанными для полевых измерений. Также на наземном уровне зачастую отбираются образцы материалов, расположенных в тестовых областях. Такая процедура может быть необходима в случае, если погодные условия или особенности местности не позволяют провести качественные измерения. Образцы, после их отбора в тестовых участках, доставляются в лабораторию, где проводится их спектрометрическое исследование с использованием лабораторных спектрометрических установок или гониофотометров.

Основным, в данном случае, является метод ключевых участков. Существующие в природе тесные взаимосвязи между различными компонентами ландшафта (рельеф, почва, растительность и др.) могут быть выявлены и зафиксированы на отдельном конкретном участке ландшафта, рассматриваемом в качестве ключевого.

Под ключевым участком следует понимать ограниченный по размерам участок территории, отражающий основное разнообразие и закономерности формирования почвенно-растительного покрова в пределах определенного ландшафта или района исследования.

При выборе ключевых участков необходимо учитывать тип ландшафта, особенности геоморфологии, растительного покрова, его распаханность, разнообразие почвообразующих и подстилающих пород и др. Количество ключевых участков в пределах одного ландшафта зависит от характера рельефа и разнообразия почвенно-растительного покрова. Площадь одного ключевого участка при крупномасштабном картографировании обычно колеблется от 100 до 300 гектаров. Каждый ключевой участок должен иметь географическую привязку.

Метод ключевых участков используется наиболее эффективно при крупномасштабном и среднемасштабном картографировании почвенно-растительного покрова.

1.3.3. Полевые наблюдения за биофизическими и спектральными характеристиками агроэкосистем

Сезонные изменения на поверхности Земли проявляются в виде закономерно чередующихся сезонных явлений природы. Каждой территории свойственны свои сезонные явления и свои календарные сроки их наступления.

По годам эти сроки непостоянны. Общеизвестны понятия «ранняя» и «поздняя» весна, «ранняя» и «поздняя» осень. Ежегодные колебания сроков наступления сезонных явлений природы нередко значительны.

Система знаний о сезонных явлениях природы о сроках их наступления и причинах, определяющих эти сроки, называется фенологией.

Определений фенологий много. Одно из наиболее развёрнутых было дано известным советским фенологом А.И. Руденко 1957 г на первом Всесоюзном фенологическом совещании, проходившем в Ленинграде: «фенология – наука, изучающая закономерности сезонного развития растительного и животного мира, а также явлений неорганической природы, в их взаимосвязи и взаимодействии».

Однако на современном этапе бурной дифференциации и интеграции наук фенология, с одной стороны, дробится на части, которые логичней считать разделами других фундаментальных наук естественного цикла: фенология растений (ботаника), фенология животных (зоология), сезонные изменения гидрологических и метеорологических процессов (гидрология метеорология) и т.д. С другой стороны, заметны тенденции отнести фенологию к физической географии определяя её как учение о сезонной динамики ландшафтов, ограждая таким образом от притязания всех остальных наук. При том и другом подходах фенология не имеет собственного объекта изучения, а стало быть, не может претендовать на научную самостоятельность

Цикл сезонного развития растений состоит из закономерно сменяющих друг друга морфологически различных этапов. Каждый из таких этапов называется сезонной, или фенологической, фазой развития. Системы фенологических фаз в зависимости от поставленной задачи разработаны с различной степенью дробности.

При фенологических наблюдениях над геосистемами используется обычно следующая, относительно простая система фитофенологических фаз, наблюдаемых у наиболее заметных представителей местной растительности:

1) начало весеннего сокодвижения (наблюдается у кленов, берёз, винограда);

2) всходы (однолетних видов, в частности сельскохозяйственных культур);

3) начало распускания почек;

4) начало облиствения;

5) начало и конец цветения;

6) начало созревания плодов;

7) начало рассеивания плодов или семян;

8) начало осеннего отмирания листьев (у листопадных и летнезелёных растений);

9) начало осеннего листопада;

10) полное осеннее расцвечивание листьев;

11) конец листопада.

Нередко желательна оценка интенсивности цветения и урожая семян и плодов. Точные количественные методы учёта интенсивности цветения и урожая

семян и плодов излагаются в специальных руководствах. Для общей глазомерной оценки урожая рекомендуется шкала Капера-Формозова.

0 – зрелых плодов не встречается совершенно;

1 – немногочисленные плоды на редких растениях; огромная часть растений данного вида без плодов или без зрелых плодов;

2 – слабый урожай плодов небольшими участками; на большинстве растений данного вида нет плодов вовсе или они не дозрели;

3 – хороший урожай плодов на небольших участках; большинство растений со слабым урожаем; имеются значительные неурожайные площади;

4 – хороший урожай плодов на многих участках; слабо урожайных и неурожайных площадей немного;

5 – обильный урожай плодов на многих участках; на остальных участках – урожай средний; неурожайные площади редки.

Аналогичным путем может быть составлена и шкала интенсивности цветения.

К сезонным явлениям растительного мира относятся также случаи повреждения или гибели тех или иных видов растений от вредных воздействий: от весенних и осенних заморозков, от засухи, от паразитарных заболеваний или животных-вредителей.

Индикаторами силы осенних заморозков служат сельскохозяйственные культуры: картофель, помидоры, огурцы, на юге – хлопчатник, клещевина, а также и декоративные виды: георгины, шалфей блестящий, бархатцы, на юге – канны. Для каждого вида отмечаются первые повреждения и полная гибель растений данного вида от заморозков.

Для низших споровых при геосистемных фенологических наблюдениях отмечаются сезонные явления наиболее широко распространенных и имеющих промысловое значение шляпочных грибов (белый гриб, подосиновик, подберезовик, масленок, волнушка, груздь, опенок осенний): появление первых единичных грибов; начало промыслового сбора (при наличии нескольких слоев за сезон наступления каждого из них отмечается отдельно); конец промыслового сбора. Развитие грибов, паразитирующих на высших растениях (мучнисторосных, ржавчинных, головневых и т. п.), отмечается в тех случаях, когда они появляются на пораженной растительности.

1.3.3. Методика наземного полевого спектрометрирования агроэкосистем. Изучение растительности агроэкосистем на основе материалов дистанционного зондирования. Факторы, влияющие на точность и достоверность наземного спектрометрирования

На величины коэффициента спектральной яркости растительных сообществ помимо главного фактора – фазы вегетации и физиологических факторов оказывают влияние следующие структурные (собственные) и внешние факторы.

1) Величина проективного покрытия растительностью подстилающей поверхности, выражаемая в относительных единицах или в процентах.

2) Относительная величина площади элемента ландшафта, занятой растениями каждого из видов, находящихся в пределах данного элемента.

3) Архитектура растений (высота, форма кроны, ориентация листьев иветвей, распределение по ярусам в растении листьев разной окраски и др.)

4) Условия наблюдения – угол сканирования и азимут Солнца.

5) Высота Солнца над горизонтом.

6) Соотношение рассеянной и прямой радиации.

7) Метеорологические факторы – ветер, влага, температура.

8) Углы поля зрения измерительной аппаратуры.

9) Очевидно, что первые три фактора являются внутренними (структурными), а остальные пять – внешними.

Внешние факторы 5 и 6 взаимосвязаны. Угловое распределение интенсивности радиации, отражаемой растительным покровом, зависит от всех перечисленных собственных и внешних факторов.

С точки зрения решения задач по моделированию условий работы аппаратуры ДЗЗ, расчета ее тактико-технических характеристик, а также определения контрастов между различными элементами ландшафта каждое из состояний данного растительного сообщества может рассматриваться как объект распознавания. Его описание функцией $R\lambda=f(\lambda)$ в первую очередь зависит от фенологической фазы и структуры растительного покрова. Под влиянием внешних факторов отношение максимальных и минимально возможных величин СКЯ посевов в надире достигает 1,5–2 раз.

У растительных сообществ сезонные вариации коэффициента спектральной яркости проявляются менее резко, чем вариации коэффициента спектральной яркости отдельных листьев. Это вызвано совместным влиянием коэффициента спектральной яркости почв, теней растений, разнородными оптическими и структурными свойствами растений, входящих в сообщество. У разных растений качество одинаковые изменения коэффициента спектральной яркости могут быть сдвинуты по фазе их появления.

При изменении углов сканирования узкоугольной аппаратуры наблюдения и азимутальных углов изменяются как величина проективного покрытия в поле зрения аппаратуры, так и условия освещения наблюдаемых растений. В данном случае, как и при наблюдении вспаханной почвы, максимальная яркость регистрируется при визировании в направлении, совпадающем с направлением падающих лучей: при $\varphi = 180°$, $\gamma \sim = 180°$. При этом в поле зрения прибора попадают листья или побеги, освещаемые прямым солнечным светом. И, наоборот, при наблюдении против Солнца, при $\varphi = 0$, в поле зрения прибора попадают преимущественно затененные части растений.

1.4. Постобработка результатов полевого спектрометрирования

1.4.1. Подготовка данных к компьютерному анализу. Подготовка исходных данных для фотометрических расчетов

Вычисление искомых фотометрических величин может производиться с помощью микрокалькуляторов, универсальных или специализированных

электронно-вычислительных машин. Во всех случаях существенной особенностью решения фотометрических задач по материалам космической фотосъемки является необходимость подготовки значительного числа исходных величин.

1.4.2. Параметры бортовой съемочной аппаратуры. Параметры, характеризующие условия съемки

Фактические значения параметров фотоаппаратуры: фокусное расстояние и диаметр действующего отверстия объектива; коэффициент пропускания оптической системы и коэффициент падения освещенности по полю кадра; продолжительность экспонирования и коэффициент полезного действия затвора; ФПМ объектива; коэффициент светорассеяния в камере и распределение его по полю кадра) определяют на заводе изготовителе и приводят в паспорте каждого конкретного образца аппаратуры. Точность определения фактических значений этих величин должна быть строго регламентирована, и находится в пределах 1–3 %.

Основными характеристиками условий съемки, от которых в значительной степени зависит точность фотометрических измерений, являются значения освещенности местности, коэффициента пропускания и коэффициента задымленности атмосферы.

Одним из путей определения оптической толщи атмосферы является использование результатов измерений, ведущихся на актинометрических и озонометрических станциях. Поэтому представляет интерес исследование возможностей интерполяции получаемых станциями значений прозрачности атмосферы.

Учитывая, что сеть метеорологических станций значительно обширнее, чем сеть актинометрических и озонометрических станций в тех случаях, когда нет данных о вертикальной прозрачности атмосферы, а в сфотографированном районе имеются метеостанции, для приближенной оценки значения оптической толщи атмосферы можно использовать корреляцию между метеорологической дальностью видимости и оптической толщей атмосферы.

1.4.2. Инструментальные и машинные денситометрические измерения

Оптическая плотность – десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания.

Единицей оптической плотности является плотность тела, ослабляющего проходящий через него поток излучения в 10 раз.

В связи с зернистым строением фотографического почернения проходящее через него излучение рассеивается. Поэтому величина оптической плотности фотографического почернения существенно зависит от условий измерения (геометрии пучков и спектрального состава используемого излучения).

Применительно к измерениям фотографических материалов приняты три основных значения оптической плотности.

Регулярная плотность D‖ – логарифм отношения направленного, нормально падающего на фотослой потока излучения к потоку, прошедшему через слой без изменения направления.

Интегральная плотность DΣ – логарифм отношения направленного, нормально падающего на фотослой потока ко всему прошедшему через слой потоку излучения в пределах телесного угла, равного оптической плотности фотографического почернения

Диффузная плотность D╫ – логарифм отношения падающего на фотослой равномерно рассеянного потока излучения к потоку, прошедшему через слой в пределах телесного угла с апертурой ≤10°.

Возможен также четвертый способ измерения оптической плотности: освещение фотоматериала равномерно рассеянным излучением и измерение всего прошедшего через слой потока в пределах телесного угла, равного 2Л. Значения оптической плотности, определяемые при таком способе измерений, в отечественной литературе называют, как и значения, получаемые при измерениях по третьей схеме, диффузной плотностью. (Т. Джеймс и Дж. Хиггинс применяют в этом случае термин дважды диффузная плотность).

Регулярная плотность наблюдается при визуальном рассматривании негативов, освещаемых направленным светом, а также при проекционной печати снимков. Интегральная плотность соответствует случаю контактной печати при направленном освещении негатива.

Диффузная плотность характеризует условия визуального изучения негативов на просмотровых столах, световое окно которых закрыто молочным или матовым стеклом, а дважды диффузная плотность имеет место при контактной печати, если негатив освещается рассеянным светом.

В случае денситометрических измерений с целью решения различных фотометрических задач по материалам космической фотосъемки значения оптической плотности полей сенситограммы используют

для сравнения с оптической плотностью изображения изучаемых объектов местности. Не имеет принципиального значения, какая именно используется при этом плотность — важно, чтобы в обоих случаях измерялась одна и та же плотность. Однако этого недостаточно. Практический опыт и результаты исследований показали, что различные типы денситометров, работающих по одной и той же принципиальной схеме (т. е. измеряющие регулярную, интегральную, диффузную плотность), все же отличаются друг от друга по геометрии потоков излучения, падающих на фотослой и измеряемых после прохождения через него.

Следствием этого является несовпадение результатов измерений оптической плотности одного и того же почернения, выполненных на приборах разного типа. Поэтому обязательным условием денситометрических измерений с целью решения фотометрических задач является использование при измерении сенситограмм и изображения объектов одного и того же прибора.

Основным общим требованием к денситометрам и микроденситометрам, предназначенным для выполнения фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки, является наличие просмотрового стола,

позволяющего не только измерять спектрограммы, но и рассматривать (дешифрировать) негатив, а также наличие устройства, обеспечивающего точное и быстрое совмещение мерного луча прибора с подлежащим измерению участком изображения.

В случае массовой обработки материалов космической фотосъемки на основе автоматизированных методов решения фотометрических задач денситометрические измерения выполняют с помощью автоматических машинных устройств ввода-вывода изображений (УВВИ).

Основой УВВИ является быстродействующий автоматизированный микроденситометр, обеспечивающий измерение дискретных значений регулярной оптической плотности квадратных участков изображения с шагом, равным размеру измеряемого участка. Минимальные размеры измеряемых участков могут быть порядка 10х10 мкм. Значения оптической плотности обычно квантуются на 255 уровней; соответственно, при оптической плотности изображения, равной двум, ступень квантования составляет приблизительно 0,008 единицы оптической плотности.

В результате измерений с помощью УВВИ фотоснимок преобразуется в матрицу значений оптической плотности, регистрируемую на магнитной ленте.

1.5. Спектральная аппаратура

1.5.1. Спектральная аппаратура дистанционного зондирования оптического диапазона длин волн (спектрометры, спектрорадиометры и пр.). Спектральные приборы для аналитических применений. Метрологическое обеспечение измерений. Опыт республики Беларусь в развитии спектрального оборудования на основе работ Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета. Устройство и особенности работы фотоспектрорадиометра (ФСР).

Спектрометрическая съёмка является одним из видов нефотографических съёмок. Её отличительной особенностью является то, что информация об объектах земной поверхности фиксируется не в виде видеоизображения, а кривых спектральной яркости.

Спектрометрирование может выполняться в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения. Для спектрометрической съемки используются специальные приборы, которые называются спектрометрами. Они регистрируют спектральные характеристики отражения.

При спектрометрировании местности одновременно ведется ее фотографическая или телевизионная съемка для привязки результатов спектрометрирования с использованием различных видеосистем. Результаты спектрометрической съемки получаются в виде кривых хода яркости по спектру – спектрорадиограммы (регистрограммы, спектра), либо сразу на экране электронно-лучевой трубки. Обработка результатов спектрометрических съемок довольно трудоемкий процесс, поэтому ведутся исследования по их автоматизации.

С использованием спектрометрической съемки можно решать следующие задачи:

• определение концентрации озона и углекислого газа в атмосфере, наличие нефтяной пленки на водной поверхности;

• изучение снежного покрова и льда;

• определение содержания паров в атмосфере;

• изучение фитогенетического состояния растительных образований;

• изучение влажности почвогрунтов.

Спектрометрические исследования подразделяются на 4 вида:

• лабораторные,

• полевые,

• воздушные

• космические.

Лабораторные спектрометрические наблюдения небольших по размеру объектов (образцов, отобранных при полевых исследованиях) выполняют для выявления зависимости спектральной отражательной способности, например, почвы от содержания гумуса, механического состава, влажности и т. д.

Лабораторные исследования являются менее информативными, по сравнению с полевыми, воздушными или космическими из-за трудности интерпретации необходимых условий (природных и физических), необходимых для получения актуальных спектрометрических данных.

Среди аппаратуры для лабораторных измерений можно выделить как отечественные, так и зарубежные образцы. В Республике Беларусь работниками отдела аэрокосмических исследований НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ совместно с НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь успешно велась разработка комплекса «Визир», позволяющего моделировать условия проведения дистанционного зондирования Земли с авиационных и космических носителей и повышать достоверность тематической классификации данных дистанционного зондирования Земли об объектах в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах – от 350 до 2500 нм в лабораторных условиях. В задачи комплекса входят измерения при различных углах освещения и визирования коэффициентов спектральной яркости разнообразных поверхностей и объектов, данных спектральной плотности энергетической яркости различных поверхностей и объектов, степени поляризации отраженного объектами излучения, составление базы данных измеряемых параметров различных поверхностей и объектов.

Еще одним прибором для лабораторных измерений является швейцарская гониометрическая система LAGOS, применяемая вместе с источником освещения в виде кварцевой галогенной лампы 1000 Вт.

В 1993–1994 гг. сотрудниками Института космических исследований (Италия) был сконструирован гониометр EGO, предназначенный для лабораторной спектрометрической съемки в диапазоне от 400 до 2500 нм. У прибора имеется 6 сенсоров с помощью которого можно получать спектрометрические данные по различным настраиваемым диапазонам и каналам.

Среди зарубежных спектрометрических приборов, применяемых в лабораторных исследованиях, стоит так же выделить гониометр ONERA/DOTA. Данная установка позволяет вести спектрометрирование в диапазоне от 420 нм до 950 нм.

В качестве лабораторных спектрометров могут быть использованы и полевые спектрометрические приборы, установленные на различные конструкции (например, гониометрические).

Полевое спектрометрирование проводится в целях определения коэффициентов спектральной яркости и индикатрис отражения отдельных объектов и геосистем нижних рангов. Его результаты служат опорой при дешифрировании объектов по спектральным признакам или по их спектральному образу на многозональных и гиперспектральных снимках. В полевых условиях изучают суточную и сезонную динамику спектральной отражательной способности природных объектов, влияние погодных условий (дождь, ветер и т.д.) и условий наблюдения (положение Солнца, угол визирования).

В НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ был разработан и создан опытный образец модульного аппаратно-программного комплекса «Калибровка» научной аппаратуры оптического диапазона для использования на наземных подспутниковых полигонах с целью калибровки авиакосмических средств дистанционного зондирования Земли.

В состав аппаратно-программного комплекса входят следующие модули:

• бортовой фотоспектрорадиометр высокого разрешения на диапазон 400–900 нм, снабженный цифровой покадровой видеосистемой и синтезом изображений и спектров и предназначенный для измерения спектральных отражательных характеристик всех типов природных поверхностей полигонов (тестовых площадок) с борта авиационных носителей и в наземных условиях (существует 4 модификации – ФСР-01–ФСР-04);

• двухканальный модульный спектрорадиометр 400–900 нм, предназначенный для одновременного измерения яркости отраженного излучения от подстилающей поверхности и освещенности падающего излучения с верхней полусферы;

• два портативных спектрорадиометра на области 800–1500 нм и 1200–2500 нм, соответственно, предназначенных для измерения в наземных стационарных условиях, с вышек и подвижных средств спектральных характеристик отражения тестовых участков природных и искусственных объектов;

• сканирующий солнечный спектрополяриметр ССП-600 на область 350–950 нм для измерения прямого солнечного и рассеянного атмосферой под различными углами излучения (существует его модификация, разработанная для полевых измерений различных природных объектов ССП-600Н);

• комплект специальных насадок для обеспечения измерений коэффициентов спектральной яркости, поляризационных характеристик, спектрального альбедо;

• специальное программное обеспечение управления, хранения и обработки данных.

Разработанный аппаратно-программный комплекс, объединяющий в своем составе пять спектральных приборов, использует новые способы спектрометрии, касающиеся, в частности комплексирования спектрорадиометров различных спектральных диапазонов, видеопривязки и регистрации изображений спектрометрируемого объекта с жесткой пространственной привязкой поля зрения спектрорадиометра к изображению, географическую привязку объектов, одновременную съемку спектров отражения подстилающей поверхности и освещающего излучения, регистрацию спектрально-угловых зависимостей рассеянного в атмосфере излучения Солнца и др.

Одним из наиболее известных гониометров полевого типа является Швейцарский полевой гониометр FIGOS, разработанный компанией Lehner & CO AG Gränichen, Швейцария. Он фактически представляет собой портативный гониометрический прибор, управляемый с помощью ПК-контроллера спектрорадиометра GER-3700. Гониометр охватывает электромагнитный спектр в диапазоне от 400 до 2500 нм в 704 каналах.

Американской компанией Sensit Technologies был сконструирован сканирующий радиометр PARABOLA III, позволяющий проводить измерения в трех диапазонах: 650–670, 810–840 и 1620–1690 нм. Он состоит из двух отдельных сенсоров, каждый из которых также включает 4 независимых радиометра.

Среди наземных спектрометрических систем стоит выделить приборы, разработанные компанией ASD. Эта небольшая компания начала решать серьезные аналитические задачи для дистанционного зондирования и быстро стала мировым лидером в проектировании и создании портативных, быстродействующих и высокоточных спектрометров видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. Приборы компании ASD используются в научно-исследовательских лабораториях и центрах дистанционного зондирования многих стран мира.

Еще одной крупной компанией по созданию спектрометрических приборов является компания GER. Созданные компанией GER полевые и бортовые спектрорадиометры и спектральные системы изображения работают в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном участках спектра и используются для дистанционного зондирования полезных ископаемых, атмосферных газов и загрязнителей, контроля растительности, а также для решения других задач.

Перед использованием полевые спектрометры проходят калибровку по длинам волн на специализированных калибровочных установках. Так же перед их использованием необходимо проверять их внешний вид на наличие повреждений во избежание некорректных результатов.

Аэроспектрометрирование выполняется с самолета или вертолета для изучения более крупных и менее однородных объектов – сельскохозяйственных полей (угодий), водоемов и т.д. Принципиальная особенность космического спектрометрирования заключается в том, что спектрометр, установленный на космическом аппарате, регистрирует суммарное излучение земной поверхности и атмосферы. Поэтому одной из задач космического спектрометрирования

является изучение влияния атмосферы на оптические характеристики земных объектов.

В НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ создан экспериментальный образец МБНА «Структура», предназначенной для регистрации в автономном режиме с борта микроспутника изображений и параметров излучений ночного и сумеречного свечения атмосферы, а также явлений, связанных с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных частиц. Изучение закономерностей, физических механизмов и природы транзиентных и аномальных явлений и процессов в верхних слоях атмосферы на ночной стороне Земли, связанных с чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера, является одним из приоритетных направлений космической деятельности.

МБНА «Структура» позволяет решать следующие задачи:

1) экспериментально отрабатывать метод оптической спектрометрии явлений верхней атмосферы;

2) исследовать методом оптической спектрометрии явления, связанные с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных частиц: спрайты (высоты 45–100 км); джеты (высоты 20–50 км); вспышки, обусловленные высыпаниями заряженных частиц, транзиентами, эффектами воздействия радиоволн на ионосферу;

3) исследовать ночные и сумеречные свечения атмосферы: пространственно-временной структуры первого эмиссионного слоя (свечения гидроксила и кислорода на высотах около 100 км); пространственно-временной структуры второго эмиссионного слоя (на высотах около 300 км); пространственно-временной изменчивости гидроксильных свечений в диапазоне высот 80–105 км; пространственно-временной структуры и спектрального состава свечений областей полярных сияний; пространственно-временной структуры и спектрального состава излучений серебристых облаков в области мезопаузы на высотах 80–86 км.

В 2010 г. на борт российского сегмента МКС была доставлена аппаратура нового класса — ФСС. В состав ФСС, наряду со спектрометром высокого разрешения, входит аппаратура регистрации изображений исследуемой земной поверхности, а также средства оперативной обработки полученных данных. Сочетание фотоаппаратуры и высокоразрешающего спектрометра позволяет повысить информативность регистрируемых данных и проводить более точную классификацию, идентификацию и определение параметров подстилающей поверхности.

ФСС является системой съемки изображений и спектров, управляемой оператором, позволяет производить съемку под различными углами к надиру, в том числе, отслеживая объект (удержание в поле зрения) при движении носителя и позволяет снимать угловые зависимости (индикатрису) рассеянного объектом излучения, обеспечивает измерения и экспресс-анализ спектральных характеристик разнообразных природных и искусственных объектов и сред.

Научная аппаратура ВСС предназначена для проведения научно-прикладных исследований в космическом эксперименте «Экспериментальная

отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф» («Ураган») с борта российского сегмента МКС. Ее использование на борту российского сегмента МКС позволит на новом качественном уровне проводить космический эксперимент «Ураган» и решать задачи эксперимента.

Научная аппаратура ВСС конструктивно выполнена в виде переносного автономного моноблока. ВСС позволяет проводить съемку как с рук оператора, так и с установочного кронштейна

Для изучения световых явлений в средней и верхней атмосфере Земли периодически разными странами в космос запускаются спутники. Первыми были тайваньский спутник Rocsat-2, микроспутник Firefly (США), спутники «Университетский–Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2». Кроме этого, на экспериментальное подтверждение теоретических положений сегодня направлены еще три проекта: российский спутник «Чибис-М», французский «Таранис» и датский эксперимент на борту МКС «АСИМ». В ближайшем будущем будут запущены малый космический аппарат для фундаментальных космических исследований ПН-2 с научной аппаратурой «РЭЛЕК» и спутников «Ломоносов».

Спектрометрическая съёмка является одним из перспективнейших направлений дистанционного зондирования природной среды. Она широко применяется для исследования различных природных объектов и решения прикладных задач по охране окружающей среды. Наиболее широко спектрометрическая съёмка используется в геоморфологии, гидрологии, биогеографии, ландшафтоведении, экологии и особенно в почвоведении. Она может проводиться как в полевых и лабораторных условиях, так и с помощью аэрокосмических летательных аппаратов. Наиболее широко для полевых исследований применяются спектрометры, при аэрокосмической съёмке различные видеоспектральные съемочные системы.

1.6. Дистанционная спектрометрия

1.6.1. Определение спектральной яркости природных объектов методами многозональной аэрокосмической съемки. Методика автоматизированного решения обратных фотометрических задач

В общем случае задача автоматизации процесса определения яркостных характеристик объектов местности по их фотоизображению может быть сформулирована так: задана матрица значений оптической плотности элементов изображения местности, требуется определить соответствующую ей матрицу значений яркости, коэффициента яркости и контраста элементов местности.

Технология автоматизированного решения обратных фотометрических задач состоит из трех основных процессов: преобразования негатива и сенситограммы в цифровую форму; подготовки и ввода в ЭВМ исходных данных; вычисления значений промежуточных параметров и искомых фотометрических величин.

Преобразование негатива в цифровую форму производят с помощью УВВИ. В результате получают матрицу значений оптической плотности элементов изображения {Dk,t}, в которой k=1, 2,... пс — число строк; t— 1, 2,..., пэ – число элементов в строке.

Исходные данные, необходимые для автоматизированного решения фотометрических задач, можно объединить в четыре группы.

1) Информация, постоянно хранящаяся в памяти компьютера (табулированные значения: освещенности равнинной местности E; коэффициента задымленности при наблюдении в надир (τ*) для разных значений альбедо местности; относительной величины коэффициента задымленности (φ, , τ*) для разных значений азимута.

2) Матрицы значений оптической плотности элементов изображения местности и полей сенситограммы, записанные на магнитной ленте.

3) Параметры бортовой съемочной аппаратуры и условия съемки (f, x0, y0, τφ,d, П, rP , t, η, lgHc ; τ*550; b; координаты опорных точек в системах УВВИ, снимка и местности; номинальная высота съемки; дата и время съемки; склонение Солнца).

4) Данные, определяющие особенности решения фотометрических задач (размер элементов матрицы; координаты объектов, если необходимо определение оптических характеристик не всей местности, а отдельных объектов).

Решение фотометрических задач по фотоснимкам горной местности требует введения в компьютер дополнительных исходных данных в виде цифровой модели рельефа, которая используется для вычисления значений освещенности элементов местности, определения коэффициентов пропускания и задымленности атмосферы, соответствующих элементам, располагающимся на разных высотах относительно уровня океана.

1.6.3. Верификация спутниковых данных с соответствующими полевыми измерениями

При сопоставлении данных спектрометров и аэрофотосистем линейное разрешение на пиксель может существенно отличаться.

В случаях, если размер поля зрения спектрометра меньше линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем или сопоставим с ним, требуется проведение спектрометрирования по области, равной по размеру области в окне изображения размером 5×5 пикселей. При этом количество зарегистрированных спектров должно быть не ниже 5. Для сопоставления данные по окну изображения, а также данные спектрометров усредняются независимо друг от друга.

В случае, если размер поля зрения спектрометра выше линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем, допускается использование спектра одной области измерений и усредненных данных по окну изображения, размеры которого будут наиболее приближены к размеру поля зрения спектрометра.

Ширина спектральных каналов в мультиспектральных камерах достаточно высока, и принято оперировать понятием функции спектрального отклика. В таком случае для сопоставления данных спектрометра с данными мультиспектральной камеры необходимо провести приведение значений спектра к функциям спектрального отклика каналов мультиспектральной камеры.

В результате для каждого спектра фотоспектрорадиометра может быть получен вектор значений СПЭЯ, который можно непосредственно сравнивать со значениями пикселей мультиспектральных изображений.

После подготовки данных для сопоставления могут быть представлены вектора значений СПЭЯ, привязанных к длинам волн. При этом сопоставляться могут либо «урезанные» вектора (в случае участия в сравнении данных мультиспектральных камер), либо полные вектора спектров, которые были приведены к единой сетке длин волн. Во всех случаях сопоставление производится для пар векторов.

При сравнении векторов необходимо использовать меры сравнения. При анализе возможно использование как одной из метрик, так и одновременно нескольких. Важно отметить, что мера сходства при использовании различных метрик может отличаться.

Результаты вычисления по мерам являются спектральными расстояниями, характеризующими близость спектральных кривых. По результатам сопоставления формируется таблица спектральных расстояний между спектрами, зарегистрированными различными приборами. Далее производится статистическая обработка результатов сопоставления в соответствии с требованиями стандартизации.

Для получения полной оценки валидации необходимо проведение измерений не менее 5 разнородных типов поверхностей.

1.7. Методы цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных

1.7.1. Цели и задачи цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных. Программное обеспечение

Для работы с данными ДЗЗ необходимо использовать специализированное программное обеспечение (ПО). Современное ПО для обработки космических снимков представлено в виде программных комплексов, которые позволяют выполнять многие необходимые операции с данными ДЗЗ. К их числу относятся такие операции, как: атмосферная, геометрическая, радиометрическая коррекции; восстановление и улучшение качества изображений с помощью мощного арсенала методов обработки изображений; трансформирование изображений, их привязка в системах географических и прямоугольных координат, ввод цифровой модели рельефа (ЦМР), составление ортофотопланов; дешифрирование изображений (в том числе автоматизированное); создание различных карт на основе космических снимков.

Прикладное программное обеспечение получения и обработки геоданных с применением данных ДЗЗ с космических аппаратов можно разделить на две категории:

− геоинформационные системы с поддержкой обработки спутниковых данных;

− программное обеспечение для обработки изображений с космических аппаратов с поддержкой функций геоинформационных систем.

К первой категории относятся такие программные продукты как ArcGIS и QGIS, ко второй – ENVI, ERDAS, ESA SNAP и др.

Большинство полнофункциональных программных пакетов являются коммерческими, поэтому актуальным становиться вопрос применения свободно распространяемых программ.

ArcGIS Pro – самое современное профессиональное настольное ГИС-приложение от компании Esri. ArcGIS Pro полностью совместим с платформой

ArcGIS, поддерживая обмен данными между ArcGIS Online и ArcGIS Enterprise с помощью веб-ГИС.

В среде проекта ГИС или многопользовательской ГИС можно использовать в работе три настольных приложения ArcGIS – ArcCatalog, ArcMap и ArcToolbox. ArcCatalog управляет хранением пространственных данных, структурой баз данных, а также записью и просмотром метаданных. ArcMap используется для всех задач создания карт и редактирования, а также для картографического анализа. ArcToolbox используется для преобразования данных и геообработки.ArcCatalog позволяет найти, просмотреть, задокументировать и организовать географические данные и создавать сложные базы геоданных для хранения этих данных. ArcCatalog предоставляет структуру для организации хранения больших объемов разнотипных данных ГИС.

ArcMap позволяет создавать карты и работать с ними. Реализован просмотр, редактирование и анализ географических данных. С помощью ArcMap вы можете создать карты, интегрируя данные многих форматов, включая шейп-файлы, покрытия, таблицы. Файлы форматов САПР, рисунки, изображения, гриды и нерегулярные триангуляционные сети (TIN).

ArcToolbox – приложение, содержащее множество инструментов для геообработки. Простые задачи геообработки выполняются с помощью инструментов в форме диалоговых окон. Доступна пакетная обработка, т. е. обработка данных происходит большими массивами без интерактивной выборки отдельных объектов.

Сейчас ArcGIS включает необходимый набор для работы с оптическими космоснимками и снимками с БПЛА и АФС. ArcGIS для ДЗЗ – это настольная часть (ArcGIS Desktop + модуль Spatial Analyst и Image Analyst) и серверное решение для быстрой визуализации, анализа и удобного доступа к растрам через веб (ArcGIS Image Server).

QGIS – одна из самых динамично развивающихся географических информационных систем с открытым исходным кодом. В настоящее время QGIS – это кроссплатформенное приложение, т. е. программа, которая может работать на разных операционных системах (Windows, Linux, Mac OS) QGIS позволяет

просматривать, создавать, редактировать и анализировать пространственные данные в различных растровых и векторных форматах, а также форматах баз данных.

Открытость исходных кодов, возможность обмениваться данными с другими ГИС и расширять функциональность с помощью плагинов делает весьма перспективным использование этой программы в образовательных, научных и прикладных целях.

Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) – представляет собой плагин с открытым исходным кодом для ГИС QGIS, реализующий контролируемую и неконтролируемую классификацию аэрокосмических снимков. Содержит инструментарий для загрузки данных ДЗЗ (Landsat, Sentinel, Aster, Modis), предварительной обработки и постобработки, калькулятор растра.

Система обработки изображений ERDAS Imagine в настоящее время является одним из наиболее развитых коммерческих продуктов для обработки данных ДЗЗ. Первоначально был разработан компанией ERDAS Inc. Erdas Imagine сочетает в себе функции не только растровой, но и векторной ГИС, а также системы для обработки изображений, ориентированной на данные аэро- и космосъемок, что позволяет его использовать профессионалам в области ДЗЗ и фотограмметрии.

Система состоит из множества модулей, которые представляют пользователю инструменты обработки изображений, инструменты импорта и экспорта изображений, инструменты монтажа изображений, трехмерной визуализации и картографирования. ERDAS Imagine относится к числу немногих программ, обеспечивающих полный комплекс работ с данными ДЗЗ от импорта из различных форматов до подготовки отчетов. Ядром ПО Erdas Imagine является один из трех вариантов базовых пакетов: Imagine Essentials, Imagine Advantage и Imagine Professional. Каждый последующий пакет включает в себя функциональные возможности предыдущего и расширяет их.

Отображение данных в ERDAS Imagine выполняется с помощью модуля Viewer, который является также мощным инструментом с широким набором решаемых задач. В программе есть функции для атмосферной коррекции, удаления дымки и шумов, корректировки спектров (модуль Radar).

Трансформирование растрового изображения осуществляется методами «ближайшего соседа», билинейной интерполяции и интерполяция полиномами высокого порядка.

Существует возможность автоматизированной классификации, для которой применяется широкий набор алгоритмов, таких, как Isodata (кластерный анализ), алгоритмы нечеткой логики, классификации на основе принципа максимального правдоподобия, расстояния Махаланобиса, параллелепипеда.

Интеграция данных разного типа с последующей их привязкой реализуется модулем AutoSync. Возможность интеграции позволяет использовать данные от источников разной природы, таких как снимки спутников, векторные карты, данные полевых исследований.

Внутренний формат графических данных IMG является открытым для растровых данных. ERDAS Imagine позволяет напрямую просматривать и

обрабатывать файлы различных растровых и векторных форматов данных, а также обладает широкими возможностями импорта и экспорта изображений.

Программный комплекс ENVI (Environment for Visualizing Images) – среда для отображения снимков) – один из наиболее эффективных и доступных программных продуктов, обеспечивающих полный цикл обработки оптико-электронных и радарных данных ДЗЗ, а также их интеграцию с данными геоинформационных систем (ГИС). ПК ENVI лицензирован ведущими операторами космических данных и обеспечивает поддержку данных ДЗЗ, полученных со спутников WorldView-1,2, GeoEye-1, QuickBird, IKONOS, RapidEye, ALOS, Pleiades-1A,1B, Cartosat-1, Landsat (в том числе Landsat 8), EO-1 (ALI, Hyperion) и др.

ПК ENVI и его дополнительные модули включают эффективные инструменты, позволяющие проводить специализированную обработку и анализ как мультиспектральных, гиперспектральных, так и радарных данных.

ПК ENVI включает в себя функции:

− по обработке и глубокому анализу гиперспектральных снимков;

− по исправлению геометрических и радиометрических искажений;

− поддержки объемных растровых и векторных форматов;

− по интерактивному улучшению изображений;

− по интерактивному дешифрированию и классификации;

− по анализу снимков в радиодиапазоне;

− построения запросов;

− оцифровки и многие другие.

ENVI содержит спектральные библиотеки и инструменты для выполнения топографического и спектрального анализа, анализа растительности и классификации изображений по следующим алгоритмам:

− K-means, ISODATA (классификация без обучения);

− метод параллелепипедов, алгоритмы минимального спектрального

расстояния, расстояния Махаланобиса, метод максимального правдоподобия, классификация с помощью спектрального угла, двоичное кодирование, дерево принятия решений, нейронная сеть (классификация с обучением).

Области, на территории которых произошли изменения, можно находитьсредствами обнаружения качественных и количественных изменений, которые входят в состав ПК ENVI.

В отличие от других пакетов по обработке снимков, в ENVI встроен удобный язык программирования IDL (InteractiveDataLanguage), так что возможно расширить функциональные возможности ENVI или создать собственные подпрограммы.

Основные преимущества ENVI:

− интуитивно понятный графический интерфейс пользователя;

− ENVI лицензирован ведущими операторами космических данных;

− интеграция с программными продуктами ArcGIS;

− открытая архитектура и наличие языка программирования IDL, с помощью которого можно автоматизировать существующие и создавать

собственные алгоритмы обработки, а также выполнять пакетную обработку данных.

Программный пакет SNAP ESA предназначен для обработки данных дистанционного зондирования, получаемых спутниковыми миссиями ESA со спутников Sentinel 2A/2B, Sentinel 3, Sentinel 5, Envisat, SMOS, PROBA V.

Общая архитектура для всех спутников ESA разрабатывается совместно Brockmann Consult, Array Systems Computing и C-S и называется платформой приложений Sentinel (SNAP).

Архитектура SNAP идеально подходит для обработки и анализа данных ДЗЗ за счет следующих технологических новшеств: расширяемость, переносимость, модульная клиентская платформа, общая абстракция данных ДЗЗ, управление памятью тайлов и платформа обработки графов автоматизации. Программный пакет SNAP ESA позволяет производить радиометрическую калибровку данных ДЗЗ, атмосферную и радиометрическую коррекцию, расчет индексных показателей, сегментацию изображений, а также классификацию с обучением и без обучения в автоматическом и ручном режиме с использованием оконного интерфейса, а также интерфейса командной строки.

Преимущество программного пакета SNAP ESA в обработке данных ДЗЗ со спутников ESA перед аналогичными программными пакетами (ENVI EXELIS, ERDAS Imagine, IDRISI) заключается в том, что:

− программный пакет SNAP ESA является открытым свободно распространяемым программным обеспечением;

− благодаря тесной связи программного обеспечения и аппаратного сегмента реализован наиболее широкий функционал по обработке данных ДЗЗ со спутников ESA;

− узкая специализация программного обеспечения на обработке данных ДЗЗ со спутников ESA сочетается с широким спектром поддерживаемыхобменных и специализированных форматов экспорта и импорта геоданных.

Рассмотренное коммерческое программное обеспечение ERDAS Imagine, ENVI обладает исключительно широкими функциональными возможностями, однако характеризуется высокой стоимостью и не предусматривает инструменты по обработке данных БКА. QGIS SCP и SNAP ESA относится к открытому свободно распространяемому программному обеспечению, однако наиболее полно их возможности раскрываются в связке с данными ДЗЗ со спутников ESA и Landsat.

1.7.2. Методы предварительной обработки ДДЗ

Все методы обработки изображений ДЗЗ могут быть разделены на две основные группы, предназначенные для частичного или полного компьютерного решения поставленной задачи:

1. Улучшение изображений (в литературе встречаются также ряд синонимичных названий: предварительная обработка изображений, коррекция изображений). Это методы, обеспечивающие преобразования снимков, направленные на облегчение визуального дешифрирования, повышение его

объективности и достоверности, а также подготовку снимков к последующему автоматизированному дешифрированию и созданию карты.

2. Тематическая обработка изображений (извлечение информации из изображений ДЗЗ). Это методы автоматизированного дешифрирования – классификации объектов по снимкам с использованием априорной информации о признаках выделяемых классов или без нее.

Предварительная обработка проводится с целью приведения цифровых космических изображений к виду, максимально удовлетворяющему конкретным целям и задачам дальнейшей их обработки различными специалистами.

Основными составляющими предварительной обработки изображений являются:

• радиометрическая коррекция;
• геометрическая коррекция;
• преобразования, улучшающие изображения для последующего дешифрирования (яркостные преобразования).

Радиометрическая коррекция космических снимков обусловлена необходимостью получения корректных значений спектральных яркостей объектов. Снимки, первоначально получаемые со спутников, записаны в виде так называемых «сырых значений» яркости (DN, Digital Number). Задачи радиометрической коррекции состоят в приведении этих значений в физические единицы (на основании калибровки); устранении влияния различий освещенности, обусловленных геометрией съемки, атмосферой, рельефом; устранении дефектов изображения.

При пассивном дистанционном зондировании Земли датчик съемочной системы улавливает отраженное солнечное или испускаемое объектами земной поверхности естественное излучение. При этом следует иметь в виду, что атмосфера не является полностью прозрачной и однородной, в ней содержатся твердые и жидкие частицы различных размеров. Состояние атмосферы влияет на значения яркости, регистрируемые съемочной системой, двумя способами – путем рассеяния и поглощения энергии. Поэтому данные дистанционного зондирования включают не только информацию о поверхности Земли, но и о состоянии атмосферы. Для тех, кто занимается количественным анализом поверхностного отражения, устранение влияния атмосферы является важным этапом предварительной обработки.

Таким образом, цель радиометрического улучшения – исправление искажений значений яркости пикселей изображения, вызванных сенсором и средой прохождения излучения (атмосферой).

Для устранения радиометрических ошибок, обусловленных дефектом сенсоров, изменением угла сканирования и системных помех предназначен этап калибровки.

Калибровка данных дистанционного зондирования является необходимым этапом их предварительной обработки для последующего анализа и извлечения тематической информации. Это связано с тем, что исходные значения пикселов представляют собой относительные безразмерные величины, определенным образом связанные с интенсивностью излучения, регистрируемого сенсором.

Каждый датчик характеризуется собственными значениями усиления и смещения, которые применяются к сигналу в момент формирования матрицы пикселов. Для сравнения сигналов от разных датчиков эти данные необходимо пересчитать в поток падающего излучения. Этот этап называется калибровкой по излучению датчика.

Если задача состоит в том, чтобы узнать, как меняются свойства объектов во времени, или сравнить их с лабораторными данными или данными полевых наблюдений, то необходимо учитывать состояние атмосферы, угол возвышения Солнца и рельеф местности. Внесение соответствующих поправок называют атмосферной, солнечной и топографической коррекцией.

В программном комплексе ENVI представлены эффективные инструменты калибровки и атмосферной коррекции:

1. Калибровка по излучению датчика (Radiometric Correction).
2. Устранение влияния атмосферы:

• стандартная абсолютная коррекция;

• стандартная относительная коррекция;

• исправления на основе заданных моделей (модуль FLAASH, модуль QUAC).

1.7.3. Методы тематической обработки ДЗЗ. Экспериментальная оценка точности

Ключевая роль на этапе тематической обработки отводится классификации, суть которой заключается в сортировке пикселей изображения в конечное количество классов, основанных на определенных значениях признаков. Процедура классификации основывается чаще всего на статистическом анализе различных характеристик изображения: пространственных, спектральных или временных. Выделяют два основных подхода к классификации: пиксельно-ориентированная и объект-ориентированная классификации.

Пиксельно-ориентированная классификация изображений ДДЗ – это группировка, при которой изображение систематизируется исходя из информации о спектральной яркости в каждом отдельном пикселе. При этом классификация проходит «пиксель за пикселем» и один пиксель может принадлежать только одному классу.

Различают абсолютную и относительную виды классификации. Абсолютная классификация идентифицирует класс поверхности Земли предварительным определением и накоплением спектральных характеристик всех классов, которые могут быть использованы в любом специфическом приложении. Ее применение требует: эффективного уменьшения влияния атмосферы и высокого спектрального разрешения и большого количества спектральных каналов, что возможно при работе с гиперспектральными изображениями. В будущем за счет огромного потенциала гиперспектральных снимков абсолютная классификация станет доминирующим подходом при обработке материалов ДЗЗ, однако в настоящий момент при работе с данной технологией возникает ряд сложностей. Так, например, изображения

авиационных гиперспектральных сенсоров содержат значительные геометрические искажения из-за нестабильности платформы, спутниковые же сенсоры имеют небольшое пространственное разрешение, а увеличение спектрального разрешения, как правило, сопровождается уменьшением отношения сигнал/шум

В настоящее время наиболее часто используемым подходом при тематической обработке остается относительная классификация, основанная на широко используемых мультиспектральных снимках и дополнительно собранных данных, которые необходимы для установления соответствия между группами пикселей со схожими значениями признаков и классами поверхности Земли. Эти данные могут быть собраны в результате полевых исследований, причем более ограниченно по сравнению с классическими полевыми методами, так как классы должны быть идентифицированы только для небольшого количества пикселей.

Согласно тому, введены дополнительные данные до или после классификации, различают два вида относительной классификации: с обучением (контролируемая классификация) и без обучения (неконтролируемая классификация).

Суть неконтролируемой классификации заключается в разделении всех пикселей изображения на группы (кластеры), название, спектральные характеристики и даже само существование которых предварительно неизвестны. Данная классификация более автоматизирована: требует минимальных начальных данных для выделения кластеров. Критерием отнесения пикселей к тому или другому кластеру служит схожесть спектральных характеристик. В задачу дешифровщика входит последующее определение соответствия выделенных кластеров классам земной поверхности, которое выполняется с использованием дополнительной информации материалов наземных наблюдений, карт и т.д. Таким образом, классификацию без обучения применяют, когда заранее неизвестно, какие объекты есть на снимке, их на изображении большое количество (более 30) и они имеют сложные границы.

Наиболее распространенные методы классификации без обучения: ISODATA и K-средних. Метод классификации без обучения ISODATA (Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных) – это процесс, который основан на кластерном анализе. К одному классу относятся пиксели, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков. Процесс выделения кластеров продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное (заранее установленное) количество итераций или максимальный процент пикселей, не изменивших свой класс во время последней итерации (этот параметр также задается заранее). Данный метод позволяет хорошо выделять кластеры в соответствии с их спектральными различиями, но требует больших временных затрат на вычисление, поскольку алгоритм может повторяться много раз и не учитывается пространственная однородность пикселей. Метод классификации без обучения K-средних (K-Means) отличается от метода ISODATA тем, что требует изначального задания некоторого количества средних значений для формирования начальных классов,

следовательно, этот метод используют, когда объекты на снимке достаточно хорошо различаются.

Полученное тематическое изображение может быть использовано для создания предварительного множества классов до выполнения классификации с обучением. Это простой метод кластеризации, требующий незначительных вычислительных затрат. К недостаткам метода относится то, что результаты кластеризации зависят от меры измерения расстояний (обычно используется евклидово расстояние), количества кластеров и начальных средних значений признаков (центров) кластеров.

Контролируемая классификация основана на использовании признаков объектов, принадлежность которых к определенному классу на местности известна (например, признаки объектов на эталонных участках). При этом происходит сравнение значения яркости каждого пикселя с эталонами, в результате каждый пиксель относится к наиболее подходящему классу объектов. Данная классификация является более точной по сравнению с неконтролируемой, и ее целесообразно проводить, когда заранее известно, какие объекты есть на снимке и что их количество незначительное (не более 30). Среди алгоритмов данной классификации можно отметить следующие способы: параллелепипедов, минимального расстояния, дистанции Махаланобиса и максимального правдоподобия. Выбор алгоритма классификации определяется наличием априорной информации, качеством используемого снимка, решаемой задачей, а также опытом и интуицией дешифровщика.

Способ параллелепипедов применяют, когда области значения яркости объектов не пересекаются. Это наиболее простой в использовании метод, заключающийся в отнесении пикселей изображения к эталонным классам, полученным в результате анализа гистограммы распределения яркости на изображении.

Поскольку область распределения значений спектральных признаков каждого из классов имеет четкие рамки, на снимке могут оказаться пиксели, не попадающие ни в одну из областей, так называемые неклассифицированные пиксели.

Способ минимального расстояния используют, когда спектральные признаки разных классов похожи и диапазоны значений их яркости перекрываются. Пиксель относится к тому эталонному классу, евклидово расстояние до центра которого в пространстве признаков минимально. При этом отсутствуют неклассифицируемые пиксели, так как в пространстве признаков каждый пиксель расположен ближе к средним значениям признаков одного из классов. Метод также прост в вычислительном отношении.

Способ дистанции Махаланобиса отличается от способа минимального расстояния лишь тем, что в процессе классификации измеряется не эвклидово, а расстояние Махаланобиса, что позволяет учесть распределение (дисперсию) значений яркости пикселей в эталонных участках, однако требует больших временных затрат на вычисления по сравнению с первыми двумя способами.

Способ максимального правдоподобия рассчитывает вероятность, с которой данный пиксель принадлежит к какому-либо классу. Количество и

параметры классов задаются пользователем путем указания обучающих выборок. Каждый пиксель относится к тому классу, к которому он может принадлежать с наибольшей вероятностью. При расчете вероятности учитывается яркость пикселя и яркость окружающих его пикселей. Данный способ имеет высокую точность, учитывает дисперсию значений признаков классов (как в решающем правиле расстояния Махаланобиса) и не оставляет неклассифицированные пиксели (как в методе минимального расстояния). Недостатком метода являются значительные вычислительные затраты.

В отличие от пиксельно-ориентированной, при использовании объектно-ориентированной классификации не пытаются классифицировать отдельный пиксель, а сосредоточиваются на объектах изображения, которые получены путем предшествующей сегментации снимка. Объекты оцениваются по их спектральным особенностям, форме и структуре. В дополнение к этому могут быть рассмотрены топологические связи отдельных объектов с их окружением. Наиболее удачно данный метод реализован в немецком программном продукте Definiens eCognition, который был создан для выделения на снимках областей приблизительно одинакового тона и/или цвета, а также для работы с очень текстурированными данными. В программе реализуется метод сегментации, целью которого является выделение областей (сегментов), однородных в каком-то определенном заданном смысле. Однородность является признаком принадлежности области к определенному классу. Меньшие объекты группируются парами и сливаются в большие (это восходящий процесс, который останавливается, когда размер объектов достигает порога разнородности, определяемого масштабным коэффициентом). Масштабный коэффициент – это абстрактный термин, который определяет максимальную позволенную разнородность для создающихся объектов изображения. С изменением масштабного коэффициента меняются размеры объектов изображения.

Процесс начинается в произвольном пикселе. Средняя разнородность объектов изображения минимизируется, слияние объектов может управляться пользователем, задающим пиксельные значения, форму и размер объектов. После сегментации создается топология для всех объектов (они «знают», где они расположены относительно других объектов). Далее проводится анализ изображения и распознавание значимых элементов, в результате чего определяются объекты и их свойства (форма, структура, иерархия, корреляция между объектами и т.д.).

При выполнении строгой классификации лишь одно значение класса присвоено пикселю. При нестрогой классификации пикселю может быть присвоено множество значений классов. При этом для каждого пикселя вычисляются функции членства, т.е. рассматривается возможность принадлежности пикселя каждому классу. Результат может быть преобразован в четкое изображение с помощью присвоения пикселю наиболее вероятного значения класса.

Субпиксельная классификация заключается в оценке состава смешанного пикселя с точки зрения пропорций классов земного покрова. Для снимков с

низким разрешением этот метод не работает, так как гомогенный земной покров (например, как у воды) довольно нетипичен.

Оценка точности результатов нечеткой и субпиксельной классификации требует наличия нечетких или справочных данных подпикселя, которые очень трудно получить. На сегодняшний момент это открытая проблема в области геоинформатики.

В последнее время на передний план выдвигаются также исследования, направленные на автоматизацию деятельности высококвалифицированных специалистов по дешифрированию снимков путём создания экспертных систем, имитирующих работу экспертов. Экспертная классификация может быть представлена в форме правила: если – «условие», тогда – «вывод». Подобным образом могут быть построены сложные комбинации правил, называемые базой знаний. Данный метод может быть применен как на пиксельном, так и на объектном уровне классификации. Качество классификации при этом увеличивается пропорционально количеству имеющейся экспертной информации. Экспертная классификация больше похожа на ГИС-анализ, чем на традиционную классификацию данных ДЗЗ. Программное обеспечение использует подход, основанный на применении правил и переменных, определенных пользователем, и различные комплексные источники информации (растровые снимки, векторные слои, графические модели, внешние программы и т.д.). Этот подход подобен логике и структуре графических моделей и обеспечивает лучшую структуру анализа сложных правил и решений. Экспертный классификатор состоит из ветвей дерева решений: гипотезы, правил (одного или нескольких) и условий. Все условия должны соблюдаться, тогда как соблюдение любого правила достаточно. Удовлетворение одного из нескольких правил приводит к принятию гипотезы. Создание точной и эффективной базы знаний является достаточно сложной задачей и может потребовать нескольких обработок и повторений. Готовые базы знаний служат основой экспертных систем, использование которых помогает осуществлять комплексный анализ космических снимков.

В последние десятилетия методы в области обработки данных ДЗЗ довольно интенсивно развиваются: появляются новые классификаторы, основанные на последних достижениях в области моделирования искусственного интеллекта и других областях прикладной математики (например, нейронные сети).

Метод искусственных нейронных сетей (ИНС) является «черным ящиком» для распознавания образов. Этот метод возник в попытке смоделировать логику человеческого мышления. Название «нейронная» используется по аналогии с человеческим мозгом (сетью нейронов), важнейшей особенностью которого является способность к обучению. Определение классов при использовании ИНС напоминает определение экспертных правил, однако ИНС строит эти правила неопределенным способом. Прежде чем ИНС сможет выполнить задачу распознавания образов, она должна обучаться с использованием соответствующего набора данных. Преимуществами нейронных сетей являются их нелинейность, возможность работы с комплексными данными (оптическими, радарными, ГИС-слоями, цифровыми моделями рельефа), отсутствие

необходимости определения правил. Недостатки – трудность обучения, невозможность управлять внутренним процессом («черный ящик»), а также делительные вычисления.

1.7.4. Мультиспектральные данные ДЗЗ. Спутниковые системы Landsat и Sentinel. Гиперспектральные данные ДЗЗ.

Мультиспектральные данные получаются при наблюдении Земли в нескольких широких спектральных диапазонах. Обычно используются в видимом и инфракрасном диапазонах. Каждый спектральный диапазон предоставляет информацию о разных характеристиках поверхности Земли, такие как растительное покров, почвы. Наиболее известные космические аппараты предоставляющие мультиспектральные данные – серия Landsat, Sentinel-2.

Программа Landsat — наиболее продолжительный проект по созданию спутниковых снимков Земли. Первый из спутников в рамках программы был запущен в 1972; последний, на настоящий момент, Landsat 9— 27 сентября 2021. Оборудование, установленное на спутниках Landsat, сделало миллиарды снимков. Снимки, полученные в США и на станциях получения данных со спутников по всему миру, являются уникальным ресурсом для проведения множества научных исследований в области сельского хозяйства, картографии, геологии, лесоводства, разведки, образования и национальной безопасности. К примеру, Landsat 7 поставляет снимки в 8 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 60 метров на точку; периодичность сбора данных для всей планеты изначально составляла 16—18 суток.

Спутники Landsat-1, 2, 3 имели следующие параметры орбиты — орбита солнечно-синхронная, субполярная; высота орбиты — 900—920 км; наклонение орбиты к плоскости экватора — 99°; период обращения — 103 минуты; повторяемость съемки — 1 раз в 18 дней.

Спутники Landsat-4, -5, -7 имели следующие параметры орбиты — орбита солнечно-синхронная, субполярная; высота орбиты — 705 км; период обращения — 98,9 минут; повторяемость съемки — 1 раз в 16 дней.

На спутниках серии Landsat стояли следующие съемочные системы:

- мультиспектральные видеокамеры Return Beam Vidicon (RVB; использовалась на Landsat-1, -2; 3 канала, 80 метров)
- панхроматические видеокамеры RVB (Landsat-3; 40 метров)
- сканирующий мультиспектральный сканер: MSS (Landsat-1, 2, 3, 4, 5)
- сканирующий тематический сканер: TM (Landsat-4, 5)
- улучшенный тематический сканер: ETM (Landsat-6)
- улучшенный тематический сканер плюс: ETM+ (Landsat-7)

Мультиспектральные сканеры MSS спутников LandSat 1—5, созданные в Santa Barbara Research Center (Hughes), предназначены для получения мультиспектральных снимков всей поверхности Земли. MSS является оптикомеханической системой со сканирующим зеркалом (период 74 мс) и телескопом рефлектором системы Ritchey-Chretien с диаметром зеркала в 22,9 см. Пространственное разрешение 80 метров, спектральные диапазоны: 0.5 — 0.6

мкм (зеленый), 0.6 — 0.7 мкм (красный), 0.7 — 0.8 мкм, 0.8 — 1.1 мкм. Калибровка детекторов происходит от каждого 2 сканирования.

Кварцевые зеркала телескопа крепятся на Инваровых стержнях. Система сконструирована таким образом, чтобы не терять фокусировку даже при сильной вибрации, которую создает колеблющееся 36 сантиметровое бериллиевое зеркало сканирования. Такое инженерное решение позволило США запустить спутники LANDSAT на 5 лет раньше французского спутника ДЗЗ SPOT (1986 год), на котором впервые использовалась двумерная матрица ПЗС-датчиков и не требовалась система сканирования.

Сборка в фокальной плоскости инструмента MSS состоит из 24 диэлектрических волноводов (оптических волокон) с экструдированными торцами размера 5 мкм, организованными в массив 4x6. Пучок волокон подводит свет к 6 кремниевым фотодиодам и 18 фотоумножительным трубкам. Для каждого из 4 спектральных диапазонов использовался свой набор из 6 детекторов. Радиометрическое разрешение каждого детектора — 0-255.

В отличие от предыдущих спутников программы, на LandSat-8 (во время тестирования назывался Landsat Data Continuity Mission), собранном в Аризоне компанией Orbital Sciences Corporation, используется не сканирующее зеркало, а схема Push broom scanner с линейными датчиками (развитие системы ALI, протестированной на спутнике Earth Observing-. В фокальной плоскости основного инструмента миссии, Operational Land Imager (OLI), установлено 14 модулей Focal Plane Modules, в каждом модуле установлено 10 линейных сенсоров различных диапазонов. Телескоп OLI состоит из 4 неподвижных зеркал. В инфракрасном инструменте Thermal Infrared Sensor (TIRS) используется сходная схема с 3 модулями в фокальной плоскости и отдельным телескопом из 4 линз, изготовленных из германия и селенида цинка.

Использование архитектуры Push broom требует огромного числа детекторов (6,5 тысяч для мультиспектрального и 13 тысяч для панхроматического канала) и увеличенных размеров фокальной плоскости, однако позволяет увеличить выдержку с примерно 10 мкс (ETM+) до 4 мс, тем самым повышая соотношение сигнал-шум. Отсутствие постоянно движущихся частей увеличивает стабильность платформы и улучшает геометрию снимков.

Sentinel-2 — семейство спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник». Спутники предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, также могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Первый спутник, Sentinel-2A, запущен 23 июня 2015 года. Запуск второго спутника, Sentinel-2B, произведён 7 марта 2017 года.

Основные области использования данных, полученных с КА Sentinel-2A, 2B:

- мониторинг состояния сельскохозяйственных культур;
- инвентаризация сельскохозяйственных угодий, создание планов землепользования, точное земледелие;

- мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- инвентаризация и оценка состояния лесов;
- широкий круг задач в области охраны окружающей среды.

Для бесплатного просмотра, анализа и скачивания материалов со спутников среднего и низкого разрешения Sentinel-1,2,3 можно воспользоваться порталами: EO Browser и Sentinel Playground. Sentinel Playground позволяет просматривать и анализировать мозаики снимков, полученных с Sentinel-2, Landsat-8 и MODIS. Самые свежие снимки со всей группировки спутников Sentinel можно бесплатно найти, просмотреть и скачать на портале Copernicus Open Access Hub. Интерфейс и функционал сервиса достаточно ограниченный.

Гиперспектральная съемка — это технология сбора и анализа данных, основанная на измерении электромагнитного излучения во множестве узких спектральных полос, простирающихся по всему видимому и инфракрасному спектру (иногда и ультрафиолетовому спектру). В отличие от обычной съемки, которая регистрирует информацию только в нескольких широких полосах (например, красный, зеленый и синий каналы), гиперспектральная съемка разделяет электромагнитное излучение на сотни или даже тысячи узких спектральных полос.

Гиперспектральные снимки обладают высоким спектральным, но низким пространственным разрешением, в то время как мультиспектральные изображения характеризуются высоким пространственным, но низким спектральным разрешением. Исследования по комбинированию данных продемонстрировали, что объединение мульти — и гиперспектральных данных позволяет точнее классифицировать объекты.

Гиперспектральные сенсоры собирают данные в виде набора изображений, каждое изображение в наборе представляет собой узкополосный диапазон длин волн электромагнитного спектра, также известный как спектральный диапазон. Эти изображения объединяются для формирования трехмерного гиперспектрального куба данных для обработки и анализа. Гиперспектральный куб содержит спектральные данные по одному измерению и пространственные данные по двум другим, которые могут быть использованы для создания подробной попиксельной химической и пространственной карты.

Пространственные и спектральные характеристики полученных гиперспектральных данных характеризуются информацией, заложенной в его пикселях. Каждый пиксель представляет собой вектор значений, которые определяют интенсивности в определенном месте (x, y пространственные координаты) в z различных диапазонах. Вектор известен как спектр пикселей, и он определяет спектральную сигнатуру пикселя, расположенного в (x, y), т. е. данные, хранящаяся в пикселе предоставляют информацию о его спектре во всем диапазоне используемого сенсора. Пиксельные спектры являются важными характеристиками при анализе гиперспектральных данных. Но эти пиксельные спектры искажаются из-за ряда факторов (шум сенсора, атмосферные эффекты и низкое разрешение и тд).

Спутниковые снимки, полученные с использованием гиперспектральных сенсоров, доступны не так широко, как мультиспектральные, ввиду небольшого

числа космических аппаратов, на борту которых установлены соответствующие сенсоры и дороговизны полученных изображений. По состоянию на 12.2023 отмечается значительный рост анонсированных проектов по запуску космических аппаратовс возможностью гиперспектральной съемки.

Преимущества гиперспектральных данных:

- Большее количество спектральных полос.
- Лучшая способность различения объектов
- Более точный анализ химического состава
- Более широкая сфера использования

Несмотря на свои преимущества, гиперспектральные данные также имеют ряд недостатков:

- Высокие требования к вычислительной мощности
- Дорогостоящее оборудование
- Ограниченное пространственное разрешение изображений
- Требуется экспертиза для интерпретации данных.

1.8. Геоинформационный анализ спектрометрических данных

1.8.1. Сбор, систематизация и геоинформационный анализ данных.

В настоящее время более 8,7 млн га или 42 % земельного фонда Беларуси занимают агроландшафты. Из них на долю пахотных земель приходится более 63 %. Растениеводство Республики Беларусь специализируется на выращивании традиционных для умеренных широт культур.

Наблюдается постепенное увеличение доли зерновых и зернобобовых культур в общей площади земель, которая к 2021 году превысила долю кормовых. Следует также отметить, что в последнее десятилетие существенно изменилась структура посевов зерновых культур: значительно увеличились площади под посевами озимой пшеницы и тритикале, сократились – под рожью и овсом.

С учетом сложившейся в Беларуси системы земледелия и структуры посевных площадей для проведения исследования отобраны наиболее распространенные виды сельскохозяйственных культур: озимая и яровая пшеница, озимая тритикале, яровой ячмень, кукуруза, многолетние травы, озимый рапс, сахарная свекла и картофель. Указанные культуры занимают ежегодно более 90 % всех пахотных земель.

В качестве учебного полигона (модельного объекта) для целей картографирования и мониторинга сельскохозяйственных культур на основе данных ДЗЗ была выбрана территория Минского района. В структуре данного района пахотные земли занимают более 35 % от общей площади района.

При этом в пределах модельного объекта был также заложен ключевой (тестовый) участок «Ждановичи», расположенный на расстоянии 7–10 км от юго-западной границы города Минска и включающий более 90 полей с произрастающими на них сельскохозяйственными посевами.

Территория тестового участка относится к Западно-Белорусской провинции, Центральному округу Белорусской гряды, району Минской возвышенности.

Выбор модельного и ключевого участков обусловлен близким расположением территории к Минску, что способствовало оперативному проведению полевых работ и сбору полевых данных о сельскохозяйственных культурах, произрастающих на территории исследования, а также позволило провести актуализацию и верификацию данных путем определения контрольных полей и их объезда в 2022 году.

С точки зрения организации учебного процесса, тестовый участок «Ждановичи» может также выступать в качестве объекта исследования для организации обучающих полевых выездов студентов на данную территорию при работе со спектральной библиотекой, изучения методик создания спектральных библиотек и полевого спектрометрирования агроландшафтов в рамках учебной дисциплины «Дистанционная спектрометрия».

Для изучения спектральных особенностей культурной растительности в целях ее картографирования и мониторинга происходящих в ней изменений с одной стороны важно учитывать географическую специфику исследуемого региона, а с другой стороны – использовать современные методы и материалы ДЗЗ, позволяющие оперативно получать информацию о спектрально-отражательных свойствах агроэкосистем на высоком уровне детальности.

Отражательные свойства сельскохозяйственных культур достаточно хорошо изучены по данным наземных и самолетных наблюдений. Исследование спектральных свойств сельскохозяйственной растительности на основе спутниковых данных разрабатываются с 1980-х годов. Современный этап исследования спектральных свойств сельскохозяйственных культур связан с развитием методов по применению цифровых многозональных спутниковых снимков.

Моделирование спектрально-отражательных образов наиболее типичных для Республики Беларусь видов сельскохозяйственных культур, изучение их диагностических свойств и разработка соответствующей спектральной библиотеки эталонов осуществлялись на основе многозональных спутниковых данных.

Был выполнен анализ доступных на момент проведения исследования спутниковых данных с точки зрения пригодности для целей картографирования растительности агроэкосистем.

При выборе исходных данных ДЗЗ с целью картографирования и мониторинга сельскохозяйственных посевов, важно учитывать ряд критериев:

• доступность (свободный / закрытый доступ);

• наличие съёмки на территорию Беларуси и исследуемый объект;

• пространственное разрешение данных;

• регулярность (периодичность) съёмки;

• режим съёмки, спектральный диапазон и спектральное разрешение данных (панхроматическая / многозональная);

• уровень обработки данных (прошедшие / не прошедшие предобработку);

• доступность программного обеспечения, возможности и качество выполнения компьютерной обработки данных.

Установлено, что наиболее информативными и оптимальными для распознавания посевов являются мультиспектральные данные съемочных систем Landsat-8 и Landsat-9, спутниковые данные Sentinel-2, которые имеют как высокое пространственное и временное разрешение, так и позволяют на их основе анализировать обширные площади сельскохозяйственных земель с мозаичной структурой размещения посевных площадей.

1.8.2. Векторизация. Создание векторной карты агроландшафтов. Маскирование изображений. Методы зональной статистики в ГИС.

Векторизацию тестовых полигонов, создание электронной карты полей и внесение атрибутивной информации рекомендовано осуществлять в программном комплексе ArcGIS. В качестве подложки для векторизации могут быть использованы:

• спутниковые данные высокого и сверхвысокого пространственного разрешения;

• материалы крупномасштабной аэрофотосъемки;

• фондовые материалы (картографические, литературные, отчетные), в т.ч. полученные от сельскохозяйственных организаций, которым принадлежали изучаемые сельскохозяйственные поля;

• данные, полученные в результате непосредственного объезда полей со специализированным GPS-оборудованием;

• векторные данные Земельной информационной системы (ЗИС) Республики Беларусь.

При этом оптимальным, с точки зрения время- и ресурсозатрат, является использование локальной ЗИС, в частности векторов с кодом 101 в поле «LANDTYPE», соответствующих пахотным видам земель.

Для ключевого участка «Ждановичи» были использованы данные GPS-объезда территории, а для модельного объекта – слой «LANDTYPE» локальной ЗИС Минского района.

В результате были составлены соответствующие векторные карты полей.

Векторная основа включает в себя атрибутивную таблицу, включающую следующую информацию: идентификатор поля, площадь, номер и название полигона, а также информацию о произрастающих видах посевов за текущий или предыдущий годы.

При этом важно отметить, что по мере геоинформационного анализа спутниковых данных, структура таблицы будет расширяться за счет столбцов с рассчитанными значениями индекса NDVI за сезон вегетации.

После создания векторной основы, с учетом ее месторасположения, формируется архив доступных спутниковых данных за требуемый сезон вегетации. При этом на этапе подбора данных необходимо проверить снимки на наличие облачности и исключить из подборки сильно зашумленные изображения.

Всего из архива Геологической службы США (USGS) было отобрано 23 сцены Landsat-8, которые в системе разграфки Landsat 8 соответствуют 184 и 185 колонкам (Path) и 22 и 23 рядам (Row).

Полный цикл работ по обработке космических снимков рекомендовано проводить в программном комплексе ENVI, зарекомендовавшем себя в качестве надежного инструмента по обработки данных ДЗЗ.

Спутниковые данные Landsat-8 за 2014–2021 годы имели уровень обработки (Collection 1 Level 1), вследствие чего были подвергнуты предварительной коррекции в модуле FLAASH (Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) программного пакета ENVI, в котором заложен ряд моделей атмосферы, а процессы радиометрической калибровки и атмосферной коррекции совмещены.

Процесс FLAASH коррекции снимков включает ряд последовательных действий:

1) радиометрическая калибровка, в результате которой значения пикселей (DN) будут пересчитаны в физические единицы излучения на сенсоре (в коэффициенты отражения Radiance);

2) затем значения Radiance пересчитываются из w/(m2*sr*um) в microWatts(cm2*sr*nm). Эти две единицы отличаются на фактор масштаба 1/10.

3) значения яркости переводятся из формата BSQ в формат BIL;

Следует отметить, что существует три основных способа организации данных в многоканальных изображениях:

- каналы, разделенные по строкам (BIL);
- попикселная запись спектральных каналов (BIP);
- поканальная запись (BSQ).

Метод BIL использует способ записи многоканальных изображений, при котором строки значений для каждого канала записываются последовательно. Например, в случае трехканального изображения, все три канала данных сначала записываются в строку 1, затем в строку 2, и т.д., пока не будет записана последняя строка изображения.

Метод BIP отличается от метода BIL тем, что данные для каждого пиксела записываются поканально. Например, при записи того же трехканального изображения, данные каналов 1, 2 и 3 записываются для первого пиксела столбца 1; затем данные каналов 1, 2 и 3 записываются для первого пиксела столбца 2 и т.д.

При поканальной записи (BSQ), информация для каждого канала записывается полностью. Другими словами, данные всех пикселов канала 1 записываются в первую очередь, затем записываются пиксели канала 2 и т.д.

Для создания цветных изображений более удобен BSQ формат, потому что три канала назначены для R (красного), G (зеленого) и B (синего).

Однако BIP формат может оказаться лучше для классификации максимальным классификатором вероятности, потому что многоканальные данные требуют попадания пиксель в пиксель при совместной обработке. BIL – это компромисс между BSQ и BIP.

Также можно воспользоваться горячей клавишей «Apply FLAASH Settings», позволяющей автоматически выполнить шаги 1–3.

4) Атмосферная коррекция в модуле FLAASH.

Формулы калибровки и пересчета показателей встроены в инструментарий программы ENVI (инструмент «FLASH Atmospheric Correctin»).

Данные о дате и времени съемки, типе сенсора, размере пикселя, координатах центра сцены программа автоматически считывает из файла метаданных. Или же в нашем случае вводим их вручную. Требуемая информация приведена в файле метаданных.

Для устранения влияния содержащегося в атмосфере водяного пара и аэрозолей в модуле FLASH реализованы шесть различных моделей атмосферы и четыре модели состава аэрозолей (на основе специально разработанной программы переноса излучений MODTRAN).

При обработке данных Landsat выбор модели атмосферы был обусловлен широтой местности и сезоном съемки, исходя из которых нам подходит модель Sub-Arctic Summer (SAS).

В качестве модели аэрозолей будем использовать встроенную модель Rual, подходящую для районов, не подвергшихся влиянию промышленных объектов и находящихся вне зоны плотной промышленной застройки и интенсивного сельского хозяйства.

В качестве метода устранения влияния аэрозолей на регистрируемые значения яркости и оценки усредненной видимости возьмем метод Кауфмана, который предполагает, что влияние аэрозолей минимально в среднем инфракрасном диапазоне (отражение менее 0,1) и существенно в видимом диапазоне спектра.

Для проверки качества коррекции были сопоставлены спектральные кривые объектов земной поверхности, построенные по исходному снимку и откорректированному изображению.

Исходя из представленных данных, были установлены существенные изменения в особенностях спектральных кривых в видимой зоне спектра.

В частности, на исходном изображении для растительности отмечены некорректные значения яркостей в видимой зоне спектра, тогда как после коррекции был отмечен правильный ход спектральной кривой, при котором наблюдаются характерные максимум в зеленой зоне (канал 3) и минимумы в синей и красной зонах (каналы 2, 4), также резкий рост спектральных кривых и ярко-выраженный максимум в ближней ИК-зоне (канал 5).

Для водных поверхностей после атмосферной коррекции отмечено постепенное уменьшение отражательной способности в сторону ИК-диапазона с минимумом в синей (2-й канал) и максимумом в зеленой (3-й канал) зоне. Для открытой почвы отмечаются общие закономерности отражения почв – повышение кривой в сторону красной зоны.

Для спутниковых снимков, имеющихся за 2022 год, характерен более высокий исходный уровень обработки (Collection 2 Level 2), предусматривающий устранение технических ошибок сенсора и влияния атмосферной среды, поэтому полученные в ходе подготовительного этапа

композитные изображения в проведении пользователем предобработки не нуждаются [13].

Дополнительно, в зависимости от расположения и размеров картографируемой территории, может потребоваться предварительное склеивание нескольких спутниковых сцен. Так в нашем случае для тестового полигона «Ждановичи» использовались единичные сцены, тогда как для картографирования территории Минского района были использованы несколько совмещенных сцен за каждую из дат.

Также в программном комплексе ArcGIS можно провести маскирование спутниковых данных с целью отсечения лишних частей спутниковой сцены для уменьшения объема используемых данных.

1.8.3. Анализ сезонной динамики значений яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра.

Таблица 1 – Яркостные и структурные дешифровочные признаки сельскохозяйственной растительности

	Оз. тритикале	Оз. пшеница	Оз. рапс	Яр. ячмень	Яр. пшеница	Мн. травы	Сах. свекла	Картофель	Кукуруза
Вторая половина мая			+						
Первая половина июня			+						
Вторая половина июня									
Первая половина июля									
Вторая половина июля									
Первая половина августа							+	+	+
Вторая половина августа							+	+	+

+	наличие уникального рисунка изображения		
	слабая растительность со схожими дешифровочными признаками		посевы в стадии полной спелости со схожими дешифровочными признаками
	обильная растительность со схожими дешифр. признаками		поля под стерней (схожие дешифровочные признаки)

Из таблицы 1 видно, что особенности были выявлены не у всех видов посевов и лишь в ограниченные временные периоды.

Из девяти исследуемых посевов специфический цвет был отмечен у посевов рапса, сахарной свеклы и картофеля. При этом визуальный анализ изображений может быть проведен по усмотрению оператора: как в среде ArcGIS, так и в ENVI.

При этом следует отметить, что для визуального анализа сельскохозяйственных угодий помимо естественной цветопередачи Red-Green-Blue (каналы 4-3-2 Landsat-8) репрезентативными являются варианты синтеза с использованием ближнего инфракрасного спектра: в комбинации каналов Green-NIR-Red (каналы 3-5-4 Landsat-8) и NIR-Red-Green (каналы 5-4-3 Landsat-8),

которые являются достаточно контрастными и позволяют наиболее достоверно отделить открытую почву от развивающихся всходов и проанализировать состояние посевов при их мониторинге.

Наиболее яркий рисунок изображения был отмечен у посевов озимого рапса. На спутниковых снимках за вторую половину мая – начало июня при комбинации красного, зеленого и синего каналов Landsat-8. Для полей с данной культурой характерен ярко-желтый цвет и однородная текстура, что обусловлено цветением рапса, сопровождающимся появлением обильного количества желтых цветов (рисунок 19).

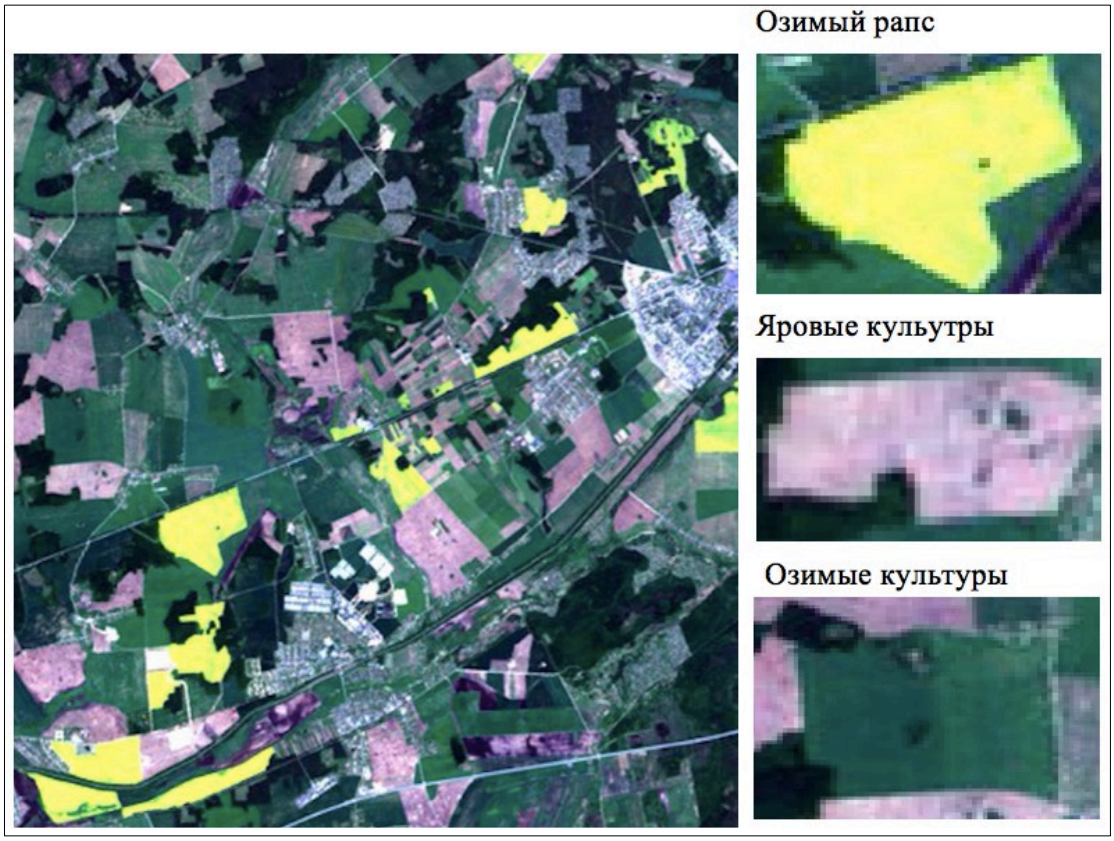

Рисунок 19 – Рисунок изображения полей (снимок Landsat-8 в комбинации каналов 4-3-2, за 22.05.2015 год)

В указанный временной период у остальных видов посевов наблюдались два основных рисунка изображения. Посевы зерновых культур и многолетних трав отображались на снимках зеленым цветом и имели однородную текстуру, а для свеклы, кукурузы и картофеля был характерен бледно-розовый цвет полей и однородная (иногда немного пятнистая) текстура.

В период с середины июня и до конца июля для всех исследуемых культур характерны схожие дешифровочные признаки. Некоторые различия яркостей можно установить лишь на основе автоматизированного анализа и крайне затруднительно определить визуально.

Посевы группы пропашных культур относятся к разным классам культурных растений, различаются по биофизическим характеристикам и, как следствие, имеют в августе достаточные для их распознавания отличия в

спектральном отклике. В августе уникальный рисунок отмечен у посевов свеклы (рисунок 20).

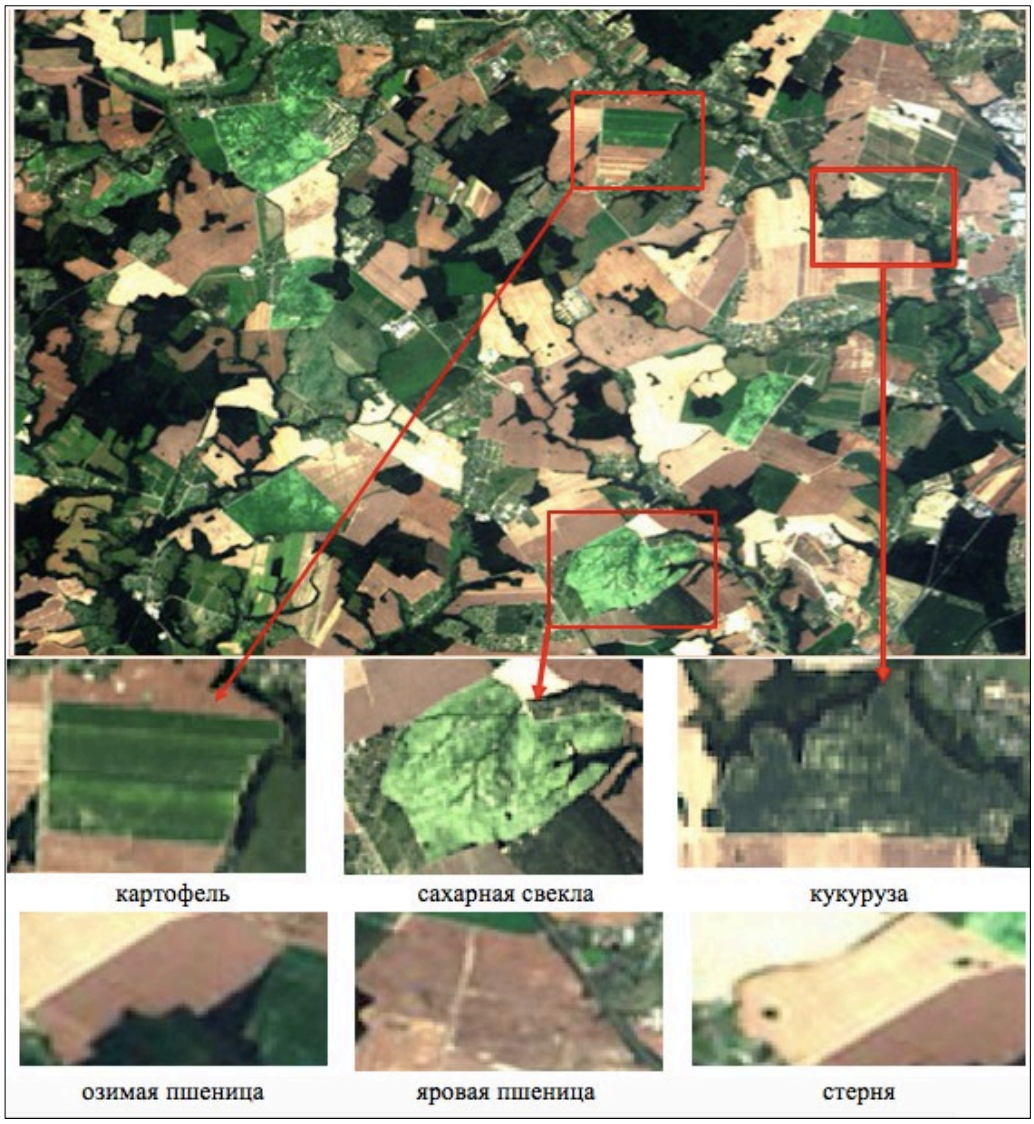

Рисунок 20 – Рисунок изображения полей (снимок Landsat-8 в комбинации каналов 4-3-2 за 08.08.2015 год)

Поля со свеклой отображаются светло-зеленым цветом и имеют специфическую крупнозернистую текстуру изображения, на которой также хорошо видна эрозионная сеть. Поля с картофелем определяются по насыщенному зеленому цвету и слабовыраженной линейной текстуре. По остаточному принципу можно определить посевы кукурузы, которые в данный период также имеют преимущественно однородную текстуру и темно-зеленый цвет, а по рисунку могут быть спутаны лишь с посевами многолетних трав.

Созревшие посевы зерновых культур на снимках отображаются коричневым цветом и имеют похожий рисунок изображения вне зависимости от того, являются они озимыми или яровыми. После уборки зерновых на полях остается стерня, для которой характерен светло-желтый или близкий к белому цвет и однородная текстура).

1.9. Статистические методы анализа спектрометрических данных

1.9.1. Математико-статистический анализ первичных данных. Инструменты зональной статистики ArcGIS и MS Excel

Операция зональной статистики вычисляет статистические показатели для значений ячеек растра (растр значений), попадающих в пределы зон, определяемые другим набором данных. Существуют два инструмента, вычисляющие статистику по зонам, Зональная статистика и Зональная статистика в таблицу.

Инструмент Зональная статистика вычисляет только один статистический показатель и создает выходные данные в виде растра. Вычисленное значение записывается в ячейки выходного растра, соответствующие каждой зоне. Если объекты зон содержат перекрывающиеся зоны, статистика вычисляется только для одной, так как ячейка выходного растра может содержать только одно значение.

Инструмент Зональная статистика в таблицу вычисляет один или несколько статистических показателей в соответствии с предварительно заданным набором, или же все статистические показатели и записывает результаты в выходную таблицу. Как и для инструмента Зональная статистика, результат представляет одно значение для каждой зоны. Таблица содержит одну запись для каждой зоны, значения статистических показателей вносятся в предварительно определенные поля. Если входные данные зон представлены перекрывающимися объектами, статистические показатели вычисляются для всех зон и в выходные данные вносится по одной записи для каждой зоны.

Входной слой зон определяет форму, значения и местоположения зон и может быть как растровым, так и векторным набором данных. Во время выполнения зональных операций векторные данные сначала конвертируются в растровый формат. В растровых данных зона определяется ячейками с одинаковыми значениями, не зависимо от того, смежные эти ячейки или нет. Зона должна иметь уникальный идентификатор, и если зоны представлены растром, он должен быть с целочисленным типом данных. Любое целочисленное или строковое поле с уникальными значениями можно указать, как поле, определяющее зоны.

Входной растр значений содержит значения ячеек, используемые в вычислении выходной статистики для каждой зоны. Он может быть как целочисленным, так и с плавающей точкой.

Для вычисления статистики инструмент сначала извлекает значения ячеек растра значений для поднаборов ячеек, попадающих в пределы каждой зоны. Идентификация ячеек растра значений в пределах зон выполняется наложением зон на растр значений. Если входные данные зон и значений являются растрами одинакового размера и ячейки выровнены, значения ячеек растра, которые совпадают с геометрией зон, извлекаются и по ним вычисляется статистика.

В случае, если либо размер ячеек, либо выравнивание растра зон отличается от растра значений, наложение ячеек, попадающих в промежутки между границами зон, возможно, будет обработано некорректно. Инструмент выполнит

внутреннюю корректировку одного или обоих растров для корректной обработки наложения несовпадающих ячеек. Это выравнивание выполняется с учетом некоторых простых правил . Если размер ячейки в растре зон и растре значений различается, то размер выходной ячейки будет Максимальный из входных, а растр значений будет использоваться как Растр привязки при внутренней конвертации. Если размер ячейки совпадает, но ячейки не выровнены, то растр значений будет использован как растр привязки при внутренней конвертации. В любом из этих случаев перед выполнением зональной операции будет инициирован внутренний пересчет.

Если в параметрах среды геообработки указаны размер ячейки, растр привязки, выходная система координат или комбинация этих параметров, зональная операция будет выполнена в окне анализа, сформированном по этим параметрам. Для дополнительной информации см. Что такое окно анализа в дополнительном модуле Spatial Analyst.

Фундаментально зональная операция является растровым анализом, и выполняется для двух растров, один из которых является растром зон, а другой – растром значений. Если зоны определяются векторными объектами – сначала выполняется внутренняя конвертация объектов в растр. Внутренняя конвертация полигонов зон использует метод центра ячейки в инструменте Полигон в растр для растеризации входного слоя с использованием размера ячейки и растра привязки, определяемых входным растром. Это может привести к неожиданному результату в виде отсутствующих зон в выходных данных, когда ни один из центров ячеек сетки растеризации не попадает в зону объекта. Это может произойти, если зона меньше области ячейки получившегося растра зон, а также в случае с большими зонами.

Многомерные растровые данные представляют данные в несколько моментов времени и/или на различных глубинах или высотах. Этот тип данных обычно используется в различных исследованиях, в частности, изучении атмосферных, океанографических и почвенных процессов, данные снимаются на платформах мониторинга, собираются спутниками или генерируется на основе численных имитационных моделей, в которых данные обрабатываются, агрегируются или интерполируются с использованием различных статистических методов.

1.9.2. Вторичные методы статистической обработки. Корреляционный анализ, регрессионный анализ, факторный анализ, дисперсионный анализ, методы сравнения первичных данных двух или нескольких выборок

Методами статистической обработки результатов экспери-мента называются математические приемы, формулы, способы количественных расчетов, с помощью которых показатели, по-лучаемые в ходе эксперимента, можно обобщать, приводить в си-стему, выявляя скрытые в них закономерности.

Речь идет о таких закономерностях статистического характера, которые су-ществуют между изучаемыми в эксперименте переменными величинами.

Данные – это основные элементы, подлежащие классифицированию или разбитые на категории с целью обработки.

Некоторые из методов математико-статистического анализа позволяют вычислять так называемые элементарные математические статистики, характеризующие выборочное распреде-ление данных, например:

- выборочное среднее,
- выборочная дисперсия,
- мода,
- медиана и ряд других.

Иные методы математической статистики позволяют судить о динамике изменения отдельных статис-тик выборки, например:

- дисперсионный анализ,
- регрессионный ана-лиз.

С помощью третьей группы методов выборочных данных, можно достоверно судить о статистических связях, существующих между переменными величинами, кото-рые исследуют в данном эксперименте:

- корреляционного анализа;
- факторного анализа;
- методов сравнения.

Все методы математико-статистического анализа условно делятся на первичные и вторичные.

Первичными называют методы, с помощью которых можно получить показатели, непосредственно отражающие результаты производимых в эксперимен-те измерений.

Вторичными называются методы статистической обработки, с помощью которых на базе первичных данных выявляют скры-тые в них статистические закономерности.

К первичным методам статистической обработки относят, например:

- определение выборочной средней величины;
- выборочной дисперсии;
- выборочной моды;
- выборочной медианы.

В число вторичных методов обычно включают:

- корреляционный анализ;
- регрессионный анализ;
- методы сравнения первичных статистик у двух или нескольких выборок.

Рассмотрим методы вычисления элементарных математичес-ких статистик, начав с выборочного среднего.

Среднее арифметическое значение – это отношение суммы всех значений данных к числу слагаемых.

Среднее значение как статистический показатель представляет собой среднюю оценку изучаемого в эксперименте психологического качества.

Эта оценка характеризует степень его развития в целом у той группы испытуемых, которая была под-вергнута психодиагностическому обследованию.

Сравнивая не-посредственно средние значения двух или нескольких выборок, мы можем судить об относительной степени развития у людей, составляющих эти выборки, оцениваемого качества.

Дисперсия – это мера разброса данных относительно среднего значения.

Чем больше дисперсия, тем больше отклонения или разброс данных. Ее определяют для того, чтобы можно было отличать друг от друга величины, имеющие одинаковую среднюю, но разный разброс.

Медианой называется значение изучаемого признака, которое делит выборку, упорядоченную по величине данного признака, пополам.

Знание медианы полезно для того, чтобы установить, явля-ется ли распределение частных значений изученного признака симметричным и приближающимся к так называемому нормаль-ному распределению. Средняя и медиана для нормального рас-пределения обычно совпадают или очень мало отличаются друг от друга.

Если выборочное распределение признаков нормаль-но, то к нему можно применять методы вторичных статистических расчетов, основанные на нормальном распределении данных. В противном случае этого делать нельзя, так как в расчеты могут вкрасться серьезные ошибки.

Мода еще одна элементарная математическая статистика и характеристика распределения опытных данных. Модой называют количественное значение исследуемого признака, наиболее часто встречающееся в выборке.

Для симметричных распределений признаков, в том числе для нормального распределения, значения моды совпадают со значениям среднего и медианы. Для других типов распре-делений, несимметричных, это не характерно.

Метод вторичной статистической обработки, посредством которого выясняется связь или прямая зависимость между двумя рядами экспериментальных данных, носит назва-ние метод корреляционного анализа. Он показывает, каким образом одно яв-ление влияет на другое или связано с ним в своей динамике. По-добного рода зависимости существуют, к примеру, между величинами, находящимися в причинно-следственных связях друг с другом. Если выясняется, что два явления статистически досто-верно коррелируют друг с другом и если при этом есть уверенность в том, что одно из них может выступать в качестве причи-ны другого явления, то отсюда определенно следует вывод о наличии между ними причинно-следственной зависимости.

Имеется несколько разновидностей данного метода. Линейный корреляционный анализ позволяет устанавливать прямые связи между переменными величинами по их абсолютным значениям. Эти связи графически выражаются прямой линией, отсюда название «линейный».

Ранговая корреляция определяет зависимость не между абсолютными значениями переменных, а между порядковыми местами, или рангами, занимаемыми ими в упорядоченном по величине ряду.

1.9.3. Особенности обработки данных в программном комплексе STATISTICA 10.0

STATISTICA – это универсальная компьютерная интегрированная система, предназначенная для статистического анализа и визуализации данных, а также разработки пользовательских приложений, содержащая широкий набор процедур анализа для применения в научных исследованиях, технике и бизнесе. Отличительной чертой системы STATISTICA является то, что в ней реализован так называемый графически-ориентированный подход к анализу данных. Смысл подхода состоит в том, чтобы получать всестороннее визуальное представление данных на всех этапах статистической обработки и на основе этого представления выбирать следующий шаг анализа.

Помимо общих статистических и графических средств, в системе имеются специализированные модули, например, для решения инженерно-технических и, в частности, промышленных задач: карты контроля качества, анализ процессов и планирование эксперимента. Работа со всеми модулями происходит в рамках единого программного пакета, для которого можно выбирать один из нескольких предложенных интерфейсов пользователя. С помощью реализованных в системе STATISTICA мощных языков программирования и языка макрокоманд, снабженных специальными средствами поддержки, пользователь может создать законченные статистические модули (процедуры) и встраивать их в различные другие приложения или вычислительные среды.

Программа использует стандартный интерфейс электронных таблиц. Предусмотрены возможность обмена данными со всеми популярными СУБД (в том числе с MS Excel и MS Access), работа с удаленными базами данных, поддержка технологий OLE, DDE и ODBC. Встроенные графический и текстовый редакторы позволяют публиковать полученные материалы на Internet-страницах.

Система STATISTICA состоит из следующих основных компонент:

•многофункциональной системы для работы с данными, которая включает в себя электронные таблицы (Spreadsheet) для ввода и задания исходных данных, а также специальных таблиц (Scrollsheet) для вывода численных результатов анализа. Для сложной (специализированной) обработки данных в STATISTICA имеется модуль Управление данными. Для статистической обработки чрезвычайно больших массивов данных имеется специальный инструмент Менеджер мегафайлов, который может быть использован и для предварительной обработки данных перед вводом их непосредственно в электронную таблицу STATISTICA;

•мощной графической системы для визуализации данных и результатов статистического анализа;

•набора статистических модулей, в которых собраны группы логически связанных между собой статистических процедур. В любом конкретном модуле можно выполнить определенный способ статистической обработки, не обращаясь к процедурам из других модулей. Каждый модуль является полноценным WINDOWS приложением. Поэтому пользователь имеет возможность одновременной работы как с одним, так и с несколькими модулями. Переключаться между ними можно как между обычными WINDOWS приложениями, например, при помощи комбинации клавиш [ALT]+[TAB] или

выбирая их на панели задач. Все основные операции при работе с данными и графические возможности доступны в любом статистическом модуле и на любом шаге анализа;

•специального инструментария для подготовки отчетов. При помощи текстового редактора, встроенного в систему, можно готовить полноценные отчеты. В STATISTICA также имеется возможность автоматического создания отчетов;

•встроенных языков SCL и STATISTICA BASIC, которые позволяют автоматизировать рутинные процессы обработки данных в системе.

Все структурные компоненты STATISTICA настолько тесно интегрированы между собой, что разделение на различные компоненты во многом условно и является полезным лишь для изучения системы с методической точки зрения.

Система STATISTICA работает с четырьмя различными типами документов, которые с соответствуют основным структурным компонентам системы:

•электронная таблица Spreadsheet, которая предназначена для ввода исходных данных и их преобразования;

•электронная таблица Scrollsheet для вывода численных и текстовых результатов анализа;

•график – документ в специальном графическом формате для визуализации графического представления численной информации;

•отчет – документ в формате RTF (Расширенный текстовой формат) для вывода текстовой и графической информации.

Всоответствии со стандартами среды WINDOWS каждый тип документа выводится в своем собственном окне в рабочей области системы STATISTICA. Как только это окно становится активным, изменяется панель инструментов и меню. В них появляются команды и кнопки, доступные для активного документа. Имеется несколько различных способов работы с системой STATISTICA.

Статистический анализ данных может быть проведен пользователем в одном из следующих режимов.

Интерактивный режим работы. В этом случае взаимодействие с системой осуществляется при помощи последовательного выбора различных команд из меню. Этот способ работы применяется обычно на этапе предварительного анализа данных. Интерактивный режим работы с системой удобен на этапе выбора математической модели явления и метода статистического анализа. После того как выбор сделан, рекомендуется использовать для автоматизации выполнения рутинных задач обработки специальные макрокоманды различных типов и встроенные в систему языки (SCL и STATISTICA BASIC).

Использование макрокоманд. В системе STATISTICA имеется возможность записи последовательности команд в одну макрокоманду. При этом можно записывать как последовательности нажатий клавиш на клавиатуре, так и движения мыши. Это удобное средство позволяет автоматизировать выполнение часто повторяющихся шагов статистического анализа.

При помощи встроенного командного языка системы STATISTICA (язык SCL – STATISTICA Command Language) пользователь имеет возможность выполнять статистическую обработку данных в пакетном режиме.

При помощи встроенного процедурного языка STATISTICA BASIC пользователь может написать свои собственные процедуры обработки данных. Это мощный язык, ориентированный на структуру данных системы STATISTICA, содержит большое количество специальных математических и статистических функций (например, вычисление всевозможных статистических распределений и т.д.).

1.10. Спектральные базы данных

1.10.1. Способы организации и хранения спектрометрических данных. Создание базs данных спектральных образцов

В настоящее время, по мнению ведущих аналитиков, одной из важнейших целей ДЗЗ по-прежнему остаётся решение обратной задачи дистанционной спектрометрии — восстановление параметров состояния и количественных данных объектов земной поверхности по их спектральным характеристикам.

Для выполнения этой задачи необходимы количественные эмпирические данные с параллельной характеристикой спектральных и предметно-содержательных свойств спектрометрируемых объектов земной поверхности, полученных в режиме in situ, т. е. спектральные эталоны (СЭ) дешифрируемых свойств рассматриваемого множества объектов.

С помощью специально подобранных выборок СЭ могут решаться как минимум две основные задачи, связанные с дешифрированием спектральных данных ДЗЗ:

1. Статистическая оценка параметров регрессионных моделей, у которых откликами выступают предметно-содержательные свойства спектрометрируемых объектов, а предикторами — компоненты их спектральных образов.

2. Численная оценка критериев оптимальности предлагаемых алгоритмов автоматической классификации и распознавания предметно-содержательных свойств спектрометрируемых объектов по их спектральным образам.

Проблема заключается в том, что данные в форме СЭ, пригодные для решения поставленных задач, практически отсутствуют как в открытом, так и в закрытом доступе. Эта ситуация не меняется долгие годы, несмотря на то, что ежегодно реализуется множество проектов, в которых одним из этапов выступают полевые исследования с целью создания необходимых для последующего анализа наборов СЭ. Тем не менее эти данные нигде не публикуются и не загружаются в общедоступные и приспособленные для этого хранилища, очевидно, по причине отсутствия таковых.

Таким образом, получается, что собранные и столь востребованные научным сообществом данные по СЭ остаются лежать «мёртвым грузом» в архивах выполненных и выполняемых проектов.

Все публично известные базы спектральных данных формально открыты для пополнения. Однако они не приспособлены для архивного хранения СЭ, отличающихся от уже имеющихся по составу своих атрибутов, и устроены так, что загружаемые в любую из них новые СЭ имеют все шансы никогда не быть найденными.

Можно сказать, что главный недостаток всех ранее созданных баз спектральных данных возник по вине заказчика. Заказчик, опираясь на имеющуюся у него коллекцию конкретных данных, просит разработчика оформить эту коллекцию в виде SQL-базы. Разработчик просто решает поставленную задачу: создаёт схему с конечным числом атрибутов, достаточным для описания каждого элемента конкретной коллекции, добавляет к списку этих атрибутов ещё один, как правило, именуемый «описание», и реализует эту схему в форме SQL-базы.

Все свойства нового элемента коллекции, не отображаемые через зарегистрированный в базе список атрибутов, при загрузке обобщаются и записываются в поле «описание». В такой базе поиск записей по значениям поля «описание» производится только вслепую — всегда есть вероятность не угадать с формулировкой поискового запроса для извлечения из базы нужных записей. Для вывода из «тени» элементов данных с новыми атрибутами приходится переделывать SQL-базу — расширять список зарегистрированных атрибутов.

Из всего вышеозначенного становиться ясным, что для создания обменного фонда СЭ необходима разработка принципиально нового универсального инструмента, призванного обслуживать нужды как каждого отдельного научно-исследовательского проекта, так и научного сообщества в целом.

Разработанный в рамках проекта «Мониторинг – СГ-1.3.1.2» программный продукт, получивший название «База спектральных эталонов» (БСЭ), позволяет эффективно решить поставленную задачу. С его помощью можно установить универсальные базовые хранилища СЭ на сетевых ресурсах неограниченного множества заинтересованных организаций, т. е. создать децентрализованную распределённую базу данных (РБД).

РБД — это совокупность логически взаимосвязанных баз данных, распределённых в компьютерной сети. РБД состоит из набора узлов, связанных коммуникационной сетью, в которой:

а) каждый узел — это полноценная СУБД сама по себе;

б) узлы взаимодействуют между собой таким образом, что пользователь любого из них может получить доступ к любым данным в сети так, как будто они находятся на его собственном узле. С подробным изложением принципов проектирования распределённых баз данных можно ознакомиться в монографии.

1.10.2. Обзор существующих баз данных спектральных образцов растительности. Атлас спектральных кривых отражения природных образований Л. Е. Кринова. ASTER Spectral Library. База данных ресурса GIS-Lab. Опыт белорусских ученых по созданию спектральных баз данных

Совместное использование данных полевых, авиационных и космических спектрометрических измерений подстилающих поверхностей является одним из перспективных подходов при дистанционном зондировании поверхности Земли. Решение обратной задачи дистанционной спектрометрии — восстановление параметров состояния и количественных характеристик объектов земной поверхности по их спектрам отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, является основной задачей дистанционных методов. Наиболее точные и достоверные результаты при обработке гиперспектральных и мультиспектральных изображений могут быть получены при использовании эталонных спектров отражения природных и антропогенных объектов.

В настоящее время хранение результатов спектрометрических съёмок обеспечивают различные библиотеки и базы данных. Среди наиболее известных библиотек спектральных данных можно выделить USGS, SPECMIN, ASTER, IGCP264 и VEG_LIB. Подробнее следует рассмотреть спектральные библиотеки, включенные в поставку ENVI. Они содержат более 4 500 спектров различных объектов. Библиотеки распределены по следующим группам:

- USGS – спектральная библиотека геологической службы США, содержащая данные о спектральной отражающей способности минералов, горных пород, грунтов, растительности. Она собрана с помощью разнообразных инструментов, названия и характеристики которых закодированы в имени спектра;
- IGCP264 – спектральная библиотека Центра исследования Земли из космоса Университета Колорадо, включающая измерения 27 хорошо изученных минералов пятью различными спектрометрами;
- VEG_LIB – спектральная библиотека в диапазоне 0,4–0,8 мкм (с шагом 1 нм) и 0,8–2,5 мкм (с шагом 4 нм), предоставленная Chris Elvidge, содержащая спектры растительности и горных пород территории биологического резервата Jasper Ridge;
- ASTER – спектральная библиотека NASA ASTER Spectral Library Version 2, включающая более 2 000 спектров природных и антропогенных объектов в диапазоне 0,4–15,4 мкм. Эта коллекция также включает спектральные библиотеки Johns Hopkins University, Jet Propulsion Laboratory и USGS – Reston.

Среди баз спектральных данных стоит отметить базу данных GIS-Lab. Она включает в себя данные как из вышеперечисленных библиотек, так и из различных литературных источников. Совсем недавно была создана децентрализованная база данных спектральных характеристик и параметров объектов земной поверхности Института географии РАН.

По результатам спектрометрических съемок с помощью спектрометров собственной разработки отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ начаты работы по созданию собственной библиотеки спектральных эталонов. В данной работе представлены результаты формирования библиотеки спектральных эталонов по результатам наземных измерений.

Наземные измерения природных и антропогенных объектов производились в пределах тестового участка «Зябровка» солнечным спектрополяриметром ССП-600 Н, модернизированным для спектрметрирования поверхности.

Исследуемые объекты были разделены на 2 класса – искусственные объекты и природные образования. В 1 класс вошли участки бетонной взлетной полосы аэродрома «Зябровка» различного состояния. Во 2 класс вошли различные виды растительности: осока разных видов, цмин песчаный, одуванчик обыкновенный и др.

Спектральная библиотека данных наземного спектрометрирования создавалась в программном продукте ENVI. В ENVI спектральные библиотеки могут быть созданы пользователем из различных источников:

- ASCII-файлы результатов измерений спектрометрами, отформатированные в соответствии с требованиями ENVI;
- Выборка спектров из спектральных библиотек ENVI;
- Выборка спектров по изображению;
- Спектральные библиотеки, созданные на основе средних значений яркостей изображения внутри ROI (области интересов);
- Внешние спектральные библиотеки [4].

Библиотека спектральных данных создавалась с помощью инструмента Spectral Library Builder на основе обработанных и откалиброванных ASCII-файлов, содержащих коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) и спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ). Указанный инструмент предоставляет пользователю наиболее полный инструментарий для создания спектральных библиотек. КСЯ выражены в относительных единицах в диапазоне от 0 до 1, а СПЭЯ – в Вт/(м^2× мкм × ср)..

Информация о дате и времени съемки, а также координаты объектов помещены в специальный служебный файл. Получить всю необходимую информацию об объекте библиотеки спектральных эталонов из служебного файла можно по названию – оно совпадает с названием исследуемого объекта библиотеки спектральных эталонов.

Данные спектральных библиотек могут иметь различные приложения в практике, например:

1. Создание обучающих выборок с дальнейшим использованием их при классификации космических снимков (например, классификация способом спектрального угла).
2. Хранение результатов спектрометрических исследований и возможность их быстрой графической интерпретации в виде кривых, возможность сглаживания результатов.
3. Проведение кросс-калибровки изображений с помощью данных наземного, авиационного и космического спектрометрирования.
4. Автоматизированная идентификация (целевой поиск) природных и антропогенных объектов на материалах (изображениях и спектрах) дистанционной съемки.

Создание библиотек и баз спектральных эталонов является довольно популярным и перспективным направлением развития дистанционных методов исследования Земли. В разработке находится библиотека спектральных эталонов, содержащая накопленные данные наземного, авиационного, космического и лабораторного спектрометрирования различных объектов, полученные за последние годы с различных участков земного шара сотрудниками НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета.

1.11. Прикладные задачи дистанционного спектрометрирования агроландшафтов

1.11.1 Перспективы развития отрасли. Системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения

Земли сельскохозяйственного назначения являются стратегическим ресурсом, обеспечивающим продовольственную безопасность населения.

Нерациональное и нецелевое использование сельскохозяйственных земель ведет к их деградации, которая заключается в утрате плодородия, зарастании, засорении и иных негативных последствиях, отрицательно влияющих на возможность получения сельскохозяйственной продукции. Для обеспечения рационального использования земельных ресурсов необходим их оперативный мониторинг. Кроме того, мониторинг земель является составной частью Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС), необходимость ведения которого закреплена международными обязательствами Республики Беларусь.

В рамках мероприятия 2.5 Союзной программы «Мониторинг-СГ» создан экспериментальный образец системы оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель (далее – система ОМЗ). Работы выполняются специалистами Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси и республиканского унитарного предприятия «Проектный институт Белгипрозем» Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь. Система ОМЗ должна обеспечить предоставление информации о состоянии сельскохозяйственных земель Республики Беларусь, а также анализ изменений (временных и пространственных), происходящих в их структуре. Источником исходной информации для системы ОМЗ могут служить данные дистанционного зондирования Земли, поступающие от различных съемочных систем космического и воздушного базирования, в т.ч. белорусского космического аппарата. Результаты оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель могут быть использованы для принятия решений в сфере управления земельными ресурсами.

Для создания специализированного программного обеспечения системы ОМЗ ведется разработка технологии и методики использования данных ДЗЗ для оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель, а также создание веб-сервиса, который должен предоставлять доступ к

результатам оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель посредством сети Интернет.

Система ОМЗ разрабатывается на основе обработки и интеграции данных ДЗЗ, цифровых карт местности (ЦКМ) и тематической информации, полученной по результатам решения функциональных задач.

Экспериментальный образец системы ОМЗ включает:

− программно-информационный комплекс оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель (ПИК ОМЗ);

− веб-сервис, обеспечивающий доступ к результатам оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель;

− методику оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель;

− тестовые полигоны, предназначенные для обработки методов автоматизированного дешифрирования сельскохозяйственных земель;

− комплект эксплуатационной документации.

Разрабатываемый ПИК ОМЗ должен обеспечивать:

− возможность выполнения операций с растровыми цифровыми снимками (ЦС) и векторными цифровыми картами (ЦК);

− поддержку пользовательских слоев пространственных данных, формируемых на основе системы классификации сельскохозяйственных земель по видам;

− возможность формирования и отображения синтезированных изображений на основе ЦС;

− поддержку библиотек топографических и тематических условных знаков.

Веб-сервис должен обеспечивать доступ к результатам оперативного дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель в сети Интернет.

Специализированные тестовые полигоны предназначены для решения методических вопросов, связанных с интерпретацией данных ДЗЗ.

Система ОМЗ должна:

− вести полуавтоматическое дешифрирование данных дистанционного зондирования;

− вести непрерывный мониторинг состояния сельскохозяйственных земель;

− выявлять изменения в структуре сельскохозяйственных земель (относительно данных предыдущей съемки);

− выявлять изменения в характере использования сельскохозяйственных земель;

− выявлять изменения контуров рабочих участков сельскохозяйственных земель;

− вести ретроспективный анализ структуры сельскохозяйственных земель;

− выявлять обрабатываемые участки за пределами сельскохозяйственных земель;

− вести информационное обеспечение сферы управления земельными ресурсами учетными и картографическими материалами о наличии, состоянии и

территориальном размещении сельскохозяйственных земель и происходящих изменениях в их структуре.

Для реализации функциональных задач ПИК ОМЗ включает следующие программные блоки:

− предварительной обработки ЦС;

− тематического дешифрирования ЦС;

− выявления изменений состояния сельскохозяйственных земель.

Программные средства веб-сервиса должны обеспечивать реализацию следующих функций:

− централизованное хранение результатов дистанционного мониторинга;

− визуализация пространственных данных в веб-браузере (с возможностью масштабирования и скроллинга изображения, выбора геоинформационных слоев, просмотра атрибутивной информации о выбранныхобъектах);

− передача пространственных данных пользователю в веб-среде.

Информационная и программная совместимость компонент системы ОМЗ, модульный принцип их построения позволяют обеспечивать наращивание функциональных возможностей без существенной переделкипрограммных блоков.

1.11.2. Распознавание видовой структуры агроэкосистем. Картосхемы динамики севооборотов по материалам ДДЗ

Результирующие тематические карты могут представляться как в векторном, так и в бумажном формате. У электронной карты все объекты (в частности, поля) полностью автономны, они могут редактироваться отдельно друг от друга, и к каждому из них может быть привязан широкий ряд характеристик (атрибутов).

В случае, если использование электронных карт затруднено по причине отсутствия в сельскохозяйственной организации (или у другого потребителя) необходимого программного обеспечения или соответствующих навыков работы в ГИС, при необходимости включения карт в различную отчетную документацию был разработан также проект аналогичной карты, предназначенной для вывода информации на бумажный носитель.

Составление тематических карт видовой структуры посевов рекомендовано осуществлять в программном комплексе ArcGIS в режиме компоновки. Формирование карты начинают с добавления к векторному слою полей соответствующей географической основы для облегчения ориентирования и выявления особенностей размещения картографируемых объектов. В качестве географической основы для карт пространственно-видовой структуры посевов рекомендовано отображать: гидрографическую сеть, контуры населенных пунктов, дорожную сеть.

В качестве исходных данных для географической основы можно использовать соответствующие тематические слои из OpenStreetMap (OSM) или же другие аналогичные наборы векторных данных (рисунок 21).

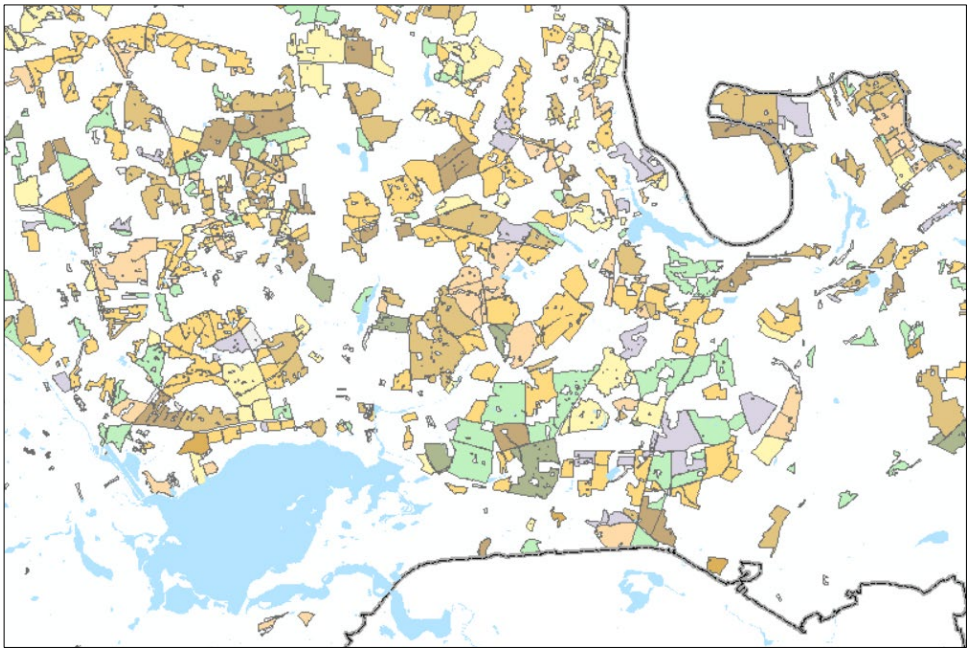

Рисунок 21 – Фрагмент отображения общегеографических элементов карты, полученных на основе OSM

На этапе создания карты важно уделить особое внимание оформлению легенды. В частности, легенда формируемой тематической карты должна обладать качествами, обязательными для всех географических карт: научной обоснованностью, актуальностью, точностью, наглядностью и удобочитаемостью, а также быть лаконичной, иметь понятные для пользователя пояснения, быть согласованной и унифицированной, т.е. позволять сопоставление и анализ карт однотипного содержания.

Важно отметить, что оформление общегеографических элементов следует проводить с таким расчетом, чтобы они не мешали чтению тематического содержания карты. С этой целью для контуров населенных пунктов желательно использовать менее интенсивные цветовые заливки. Отображение элементов географической основы в легенде карты также должно отличаться логичностью построения.

В частности, совокупность общегеографических элементов должна составить первый блок легенды, а обозначения тематического содержания (вид посева) приводится во втором блоке легенды.

Карты должны иметь художественную и тематически-обоснованную окраску. Правильно подобранные цвета и изменение их тональности позволяют дифференцировать содержание карты и тем самым способствуют повышению её выразительности, помогают объединить на одной карте большое число различных объектов или же, наоборот, указывают на различия между ними.

Была разработана цветовая шкала для обозначения видов посевов в легенде создаваемой карты (таблица 2).

Таблица 2 – Цветовое обозначение для отображения на карте видов сельскохозяйственных посевов

Цветовое обозначение	Вид посевов	Код цвета RGB	Код цвета CMYK
	озимая пшеница	R:255 G:247 B:180	C:4 M:3 Y:31 K:0
	озимая тритикале	R:216 G:226 B:008	C:16 M:0 Y:92 K:1
	озимый рапс	R:255 G:238 B:073	C:4 M:3 Y:74 K:0
	яровая пшеница	R:255 G:211 B:191	C:1 M:18 Y:17 K:0
	яровой ячмень	R:249 G:165 B:142	C:1 M:40 Y:35 K:0
	кукуруза	R:173 G:184 B:145	C:32 M:15 Y:44 K:1
	сахарная свекла	R:192 G:242 B:192	C:22 M:0 Y:26 K:0
	картофель	R:196 G:169 B:122	C:20 M:27 Y:54 K:2
	многолетние травы	R:147 G:199 B:188	C:41 M:5 Y:23 K:0
	нераспознанные посевы	R:206 G:206 B:206	C:17 M:12 Y:10 K:0

В таблице приведены коды цвета, которые позволят провести их идентификацию в различных цветовых моделях, применяемых для отображения цвета на разных выводных устройствах. В частности, в электронном виде (т.е. на мониторах компьютеров) более качественная и точная цветопередача характерна для цветовой шкалы CMYK, тогда как для вывода на печать предпочтительно конвертировать цвета в модель RGB.

Неотъемлемым элементом любой карты является масштаб. Масштабы на картах могут быть представлены разными типами: численными или графическими. Масштаб электронных карт не является фиксированным, может задаваться и корректироваться пользователем непосредственно в процессе работы с картой.

Для создания печатной версии карты рекомендовано использовать численный масштаб. Его записывают в виде дроби, в числителе которой стоит единица, а в знаменателе – степень уменьшения проекции. Масштаб определяется опытным путем исходя из формата бумаги, на которой будет распечатана карта. Так, например, для распечатки на листе формата А4 стоит использовать масштаб 1 : 320 000. При подготовке макета карты на печать допустимо также использование линейного масштаба (т.е. в масштабной линейки, разделённой на равные части).

На основе выше описанных методических приемов были разработаны карты видовой структуры посевов Минского района.

При организации учебных занятий, рекомендовано отработать методику создания карт на основе данных за 2015 год, а для закрепления навыков самостоятельной работы студентам рекомендовано выполнить аналогичные работы самостоятельно на основе данных за 2022 год.

Учитывая, что картографические произведения данной тематики (базирующиеся на основе ДДЗ) разрабатываются впервые, то технология создания данной карты с ее атрибутами может быть использована в качестве шаблона для создания карт аналогичной тематики за другие годы или для другой территории (административных районов или отдельных сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь).

1.11.3. Детектирование фаз вегетации зерновых культур по данным ДДЗ. Картосхемы динамики объема фитомассы и текущего состояния посевов

При компьютерной обработке данных ДЗЗ особое значение имеют методы автоматизированного дешифрирования – так называемой «классификации изображения». Классификация изображений представляет собой распределение всех пикселей снимка по классам в соответствии с уровнем спектральной яркости представляемых ими объектов на основании заданного алгоритма – правила классификации. Выделяют контролируемую классификацию (классификация с обучением) и неконтролируемую классификацию (классификация без обучения, кластеризация).

Для отработки навыков автоматизированного распознавания видов сельскохозяйственных посевов по данным ДЗЗ классификацию спутниковых изображений можно проводить как на примере ключевого участка, так и в целом для модельного объекта (пахотных земель Минского района).

Точность классификации существенно зависит не только от выбранного метода спектральных преобразований, но и от даты съемки, на которую был взят космический снимок. Раздельный анализ групп посевов позволяет повысить чувствительность процедур автоматизированного дешифрирования и при этом использовать для дешифрирования снимки, наиболее репрезентативные для каждой группы.

Для автоматизированного распознавания посевов в пределах каждой из групп были выявлены оптимальные даты: группа озимых культур – первая половина июня, 2 группа – конец мая – начало июня и/или первая половина июля, 3 группа – снимок за август. При наличии полигонов, которые не удалось по значениям NDVI отнести ни к одной из указанных групп, также создаётся соответствующая дополнительная группа.

Размер и расположение классифицируемого объекта может меняться, как и даты, за которые получены спутниковые снимки. Тем не менее общая логика проведения работ по автоматизированному дешифрированию остается неизменной: автоматизированное дешифрирование представлено не как одномоментная итерация, а как набор последовательных действий по отделению определенных фрагментов снимка от «основной части» изображения.

Главная цель маскирования – последовательное отсечение от космического снимка всех территорий, на которых заведомо отсутствуют объекты, интересующие исследователя.

Чтобы создать маску, предварительно нужно подгрузить в программу спутниковый снимок и векторный шейп-файл, по которому планируется обрезка изображения.

Маскирование проводится с использованием следующих инструментов ПК ENVI: Raster Management → Masking → Build Mask . Необходимо отметить, что в процессе выполнения действий для сохранения маски рекомендовано указывать директорию на компьютер, а не использовать память программы. В противном случае может появиться ошибка отображения, представляющая собой серый прямоугольник, вместо необходимой маски (рисунок 22).

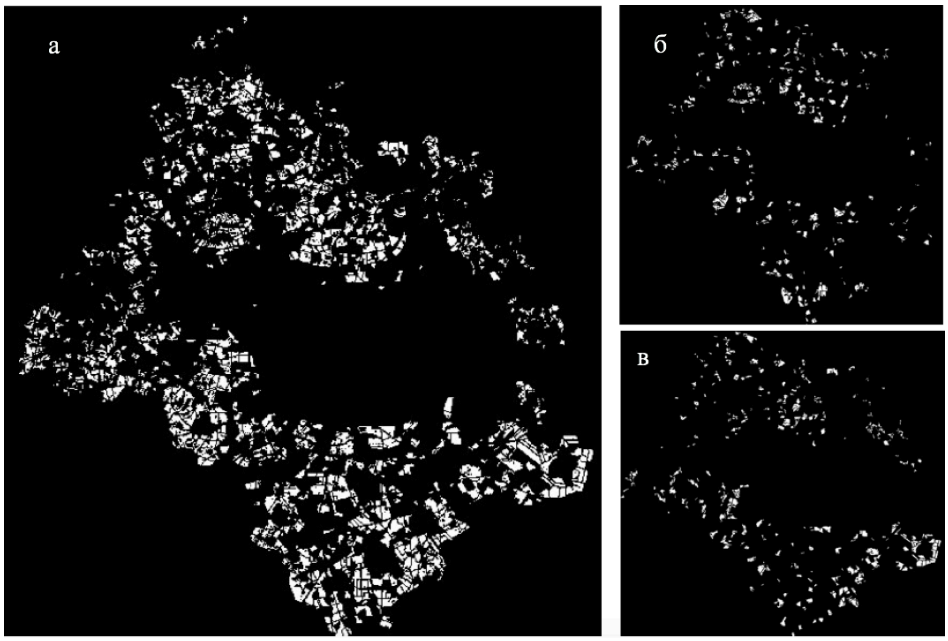

Рисунок 22 – Пример маскированных изображений: а) для пахотных земель Минского района; б) для группы озимых посевов; в) для группы яровых зерновых

Всего необходимо создать 5 масок: одну по границам всех пахотных земель векторного шейр-файла и 4 маски для каждой из выше описанных.

В качестве метода автоматизированного дешифрирования рекомендована классификация с обучением (контролируемая классификация) способом максимального правдоподобия, в которой используются спектральные сигнатуры, полученные из обучающих выборок:

→ Classification → Supervised Classification → Maximum Likelihood Classification.

В процессе данного вида классификации происходит сравнение значения яркости каждого пикселя с эталонами, после чего каждый пиксель относится к наиболее подходящему классу объектов.

Процесс создания эталонов для формирования обучающей выборки заключается в выделении на спутниковом снимке фрагментов изображения, однозначно относящихся к определенной сельскохозяйственной культуре.

В качестве эталонов для классификации выступают участки с заведомо известным видом сельскохозяйственной растительности, установленные в период полевых объездов территории, а также поля, достоверно распознанные по структурным признакам.

С помощью инструмент Region of Interest (ROI) ПК ENVI для каждого вида распознаваемых посевов могут быть сформированы соответствующие области интереса ROI (рисунок 23).

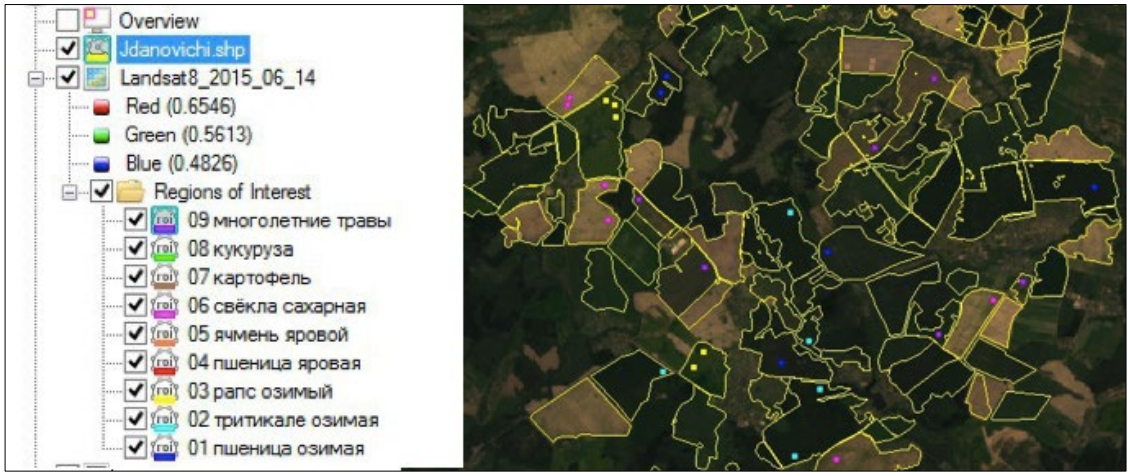

Рисунок 23 – Пример организации и отображения ROI для 9 видов культур в ПК ENVI

Местоположение ROI определяется исходя из следующих критериев: для ROI отбирались участки с однородным спектральным откликом; входящая в состав ROI территория была свободна от облачности; ROI строились на одних и тех же участках для сравнения спектральных кривых, полученных по снимкам за разные даты.

Для отработки навыков автоматизированного дешифрирования предлагается проведение классификации для модельного объекта с проведением следующих вариантов классификации:

✓ Классификация всего снимка с 9 видами культур: за 2015/06/14 и за 2015/08/08.

✓ Классификация по маске для отдельных групп посевов:

•классификация группы озимых посевов (1) используя рои тритикале, озимой пшеницы и рапса за 2015/06/14;

•классификация группы яровых зерновых посевов (2), используя рои ярового ячменя и яровой пшеницы за 2015/06/14;

•классификация группы пропашных посевов (3), используя рои кукурузы, картофеля и свеклы за 2015/08/08;

•классификация группы нераспознанных (используя рои всех 9 видов культур) – за 2015/06/14 и 2015/08/08.

1.11.4. Детектирование и картографирование эрозионных процессов на пахотных землях

Использование снимков, распространяемых на бесплатной основе в цифровом виде и за разные временные интервалы, позволяет определить различные показатели заовраженности: густоту овражной сети (км / км^2), плотность оврагов (ед. / км^2), площадную и линейную динамику овражной сети.

Наиболее информативными в изучении овражной эрозии являются осенние и весенние снимки. На зимних снимках хорошо прослеживаются тальвеги оврагов, но на них сложно выделить бровку, а также возникают трудности в определении стадии развития оврага. Стадии развития овражных форм хорошо прослеживаются на летних снимках, но к их недостаткам можно отнести то, что под густой растительностью сложно дешифрируются донные овраги. Условием повышения качества результатов дешифрирования служит наличие нескольких снимков, полученных в разные сезоны года.

Высокие требования предъявляются к качеству съемочных материалов, а именно к их разрешению. Установлено, что для надежного дешифрирования овражных форм могут быть использованы космические снимки, синтезированные в естественных цветах с разрешением 0.5–1.5 м, которые относятся к снимкам высокого и сверхвысокого разрешения: на них выявляются овраги всех типов и стадий развития.

При определении овражных форм по космоснимкам важным этапом является формирование системы дешифровочных признаков.

К дешифровочным признакам оврагов относятся характерная плановая форма с резкими, геометрически хорошо выраженными границами; наличие четкой бровки и четкой линии тальвега; контрастный фототон на разных бортах оврага, который свидетельствует о V-образном профиле оврага, и чем контрастнее он на снимке, тем больше глубина вреза оврага; наличие отдельных более светлых участков на склонах оврага, соответствующих обнаженным (незадернованным) участкам.

При дешифрировании выделяются овраги разных типов: а) склоновые; б) донные; в) береговые. При этом очень важно отличать их от других линейных форм. Так, промоина отличается от оврага незначительной глубиной, которая не превышает 1.5 м, и шириной менее 3 м. С ростом в длину происходит и углубление промоины, которая переходит в следующую стадию развития (овраг).

Склоны оврага являются «осыпными» и в основном формируются в результате обвалов и осыпания стенок. На склонах же балки наблюдается вполне сформированный, характерный для территории исследования почвенный покров. Дно балки обычно имеет трапециевидную форму. На космоснимке для балки обычно характерны размытые границы бровки и отсутствие четкой линии тальвега.

При дешифрировании оврагов и последующей верификации данных на местности были выявлены следующие признаки дешифрирования.

1. Хорошо выраженная вершина, определенная по космическому снимку, на местности соответствует активному эрозионному врезу оврага. Изгиб

привершинной части свидетельствует о наличии двух вершин либо о зарождающемся отвершке.

2. Слабо задернованная верхняя часть бортов со следами срыва дерна и его нависания на космоснимке формирует четко выраженную бровку.

3. Основный признак устьевой части – резкое уменьшение ширины оврага, либо начало размытости границ бровки.

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1. Подготовка полевых спектральных данных к компьютерному анализу

Цель работы – изучить особенности, структуру и состав исходных данных наземных спектрометрических измерений, а также методы их предварительной рбработки.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.2. Радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция ДДЗ с помощью модуля FLAASH программного пакета ENVI

Цель работы – освоить инструменты калибровки и атмосферной коррекции, представленные в программном комплексе ENVI.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Радиометрическая и атмосферная коррекция космических снимков в программном комплексе ENVI : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Цифровая обработка космических снимков» для студентов специальностей 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)» / А.А. Топаз, Ю.С. Давидович. – Минск: БГУ, 2022. – 28 с. – [Электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: https://elib.bsu.by/handle/123456789/283006 – Дата доступа: 22.03.2024.

2.3. Автоматизированное дешифрирование и построение кривых спектральной яркости в ENVI

Цель работы – произвести автоматизированное дешифрирование различных видов сельскохозяйственных культур по материалам многозональной съемки в программном комплексе ENVI, произвести анализ полученных результатов с использованием яркостных и структурных показателей.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.4. Создание векторной карты полей для пространственного моделирования и анализа в ArcGIS (модуль Spatial Analyst)

Цель работы – составить векторную карту полей в целях дальнейшего анализа в программном комплексе ArcGIS.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.5. Геоинформационный анализ спектральной информации методами зональной статистики ArcGIS (модуль Spatial Analyst), построение кривых спектральной яркости

Цель работы – проанализировать полученную спектральную информацию с использованием зональной статистики ArcGIS модуля Spatial Analyst и построить кривые спектральной яркости.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.6. Знакомство с интерфейсом программы STATISTICA 10.0

Цель работы – ознакомиться с базовым интерфейсом программы STATISTICA 10.0.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Статистическая обработка информации с помощью пакета «Statistica»: учеб-метод. пособие / сост. В. А. Грабауров. – Минск: БГАТУ, 2008. – 96 с.

2.7. Корреляционный анализ значений яркости, полученных по спутниковым снимкам и на основе полевого спектрометрирования

Цель работы – произвести корреляционный анализ полученных спектрометрических данных и оценить силу связей, а также ее достоверность в программном продукте STATISTICA 10.0.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг

сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. - Дата доступа: 20.03.2024.

2.8. Проверка распределения данных и дисперсионный анализ спектральных данных

Цель работы – проверить спектрометрические данные на нормальность распределения, провести их дисперсионный анализ в программном продукте STATISTICA 10.0.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. - Дата доступа: 20.03.2024; Математические методы в географии: электронный учебно-методический комплекс для специальностей: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление специальности: 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)»; 1-31 02 03 «Космоаэрокартография»; 1-33 01 02 «Геоэкология» / А.А. Карпиченко, Н.К. Чертко; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. почвоведения и геоинформационных систем. – Минск: БГУ, 2019. – 61 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/handle/123456789/241510?mode=full&ysclid=lw4jlp68fe721547513. - Дата доступа: 20.03.2024.

2.9. Разработка структуры электронной базы данных спектральных образцов сельскохозяйственных культур в MS Access

Цель работы – разработать структуры электронной базы спектральных данных в программном продукте MS Access.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск: БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.10. Наполнение базы данных полевыми спектральными образцами агрокультур

Цель работы – произвести загрузку базы данных наземными спектральными эталонами в программном продукте MS Access.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. – Дата доступа: 20.03.2024.

2.11. Наполнение базы данных дистанционными спектральными образцами агрокультур

Цель работы – произвести загрузку базы данных спутниковыми спектральными эталонами в программном продукте MS Access.

Методические указания по выполнению работы приведены в учебно-методических рекомендациях: Картографирование и мониторинг сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Дистанционная спектрометрия» для студентов специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Е. В. Казяк, Ю. С. Давидович, Н. А. Шестаков. – Минск : БГУ, 2024. – 47 с. Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310815. - Дата доступа: 20.03.2024.

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

3.1. Примерный перечень вопросов к зачету по учебной дисциплине «Дистанционная спектрометрия» для студентов 4 курса специальности «Космоаэрокартография»

1. Предмет и задачи дисциплины. Связь с другими науками.
2. Теоретические основы дисциплины, основные понятия и определения.
3. История развития дистанционного спектрометрирования.
4. Физические основы дистанционного зондирования и спектрально-отражательные свойства агроэкосистем.
5. Коэффициенты спектральной яркости (КСЯ).
6. Особенности спектрального отражения почвенного покрова и обнажений.
7. Спектрально-отражательные свойства водных объектов.
8. Спектральные коэффициенты яркости растительных сообществ.
9. Особенности спектрального отклика различных видов сельскохозяйственных культур.
10. Наземные, воздушные и космические методы спектрометрирования.
11. Методика наземного полевого спектрометрирования агроэкосистем.
12. Постобработка результатов полевого спектрометрирования.
13. Спектральная аппаратура (спектрометры, спектрорадиометры и пр.). Устройство и особенности работы фотоспектрорадиометра (ФСР).
14. Определение спектральной яркости природных объектов методами многозональной аэрокосмической сьемки.
15. Мультиспектральные данные ДЗЗ. Спутниковая система Landsat; спутниковая система Santinel.
16. Верификация спутниковых данных с соответствующими полевыми измерениями.
17. Программное обеспечение для цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных.
18. Методы предварительной обработки ДДЗ.
19. Методы тематической обработки изображений ДЗЗ.
20. Геоинформационный анализ спектрометрических данных.
21. Методы зональной статистики в ГИС.
22. Статистические методы анализа спектрометрических данных.
23. Особенности обработки спектральных данных в программном комплексе STATISTICA 10.0.
24. Спектральные базы данных.
25. Прикладные задачи дистанционного спектрометрирования агроландшафтов, перспективы развития отрасли.

3.2. Примерный перечень заданий в тестовой форме

1. *Инфракрасная тепловая съемка может вестись в следующих окнах прозрачности атмосферы:* _____

2. *В логической структуре дешифрирования выделяются следующие ступени:* _____

3. *Количественно достоверность дешифрирования выражается в:* _____

4. *Минимум отражательной способности для растительности наблюдается в зоне с длиной волны:* _____

5. *С использованием полевого метода дешифрирования выполняются следующие этапы:* _____

6. *За начало аэрокосмической съемки лесной растительности на панхроматическую пленку для юго-запада Беларуси принята дата:* _____

7. *При почвенных исследованиях используются следующие варианты генетического дешифрирования аэрокосмических снимков:* _____

8. *Коэффициент интегральной яркости определяется через отношение:* _____

9. *Самая поздняя дата аэрокосмической съемки для территорий северо-востока Беларуси, покрытых лесной растительностью, на панхроматическую пленку является дата* _____ *, а спектрозональную –* _____

10. *Установить правильную последовательность границ цветовых зон в нм со следующими названиями цветов:*

а) желтый;
б) синий;
в) зеленый;
г) оранжевый;
д) голубой;
е) желто-зеленый;
ж) фиолетовый;
з) красный.

11. *Дешифрируемость аэрокосмических снимков выражается через отношение:* _____

12. *Самая ранняя дата аэрокосмической съемки территорий под лесной растительностью для юго-запада Беларуси на панхроматическую пленку является дата* _____ *, а спектрозональную –* _____

13. *Пространственное разрешение снимков Белорусского космического аппарата в панхроматическом режиме составляет* _____ *, а в мультиспектральном –* _____

14. *Для дешифрирования растительности используется пять следующих индикационных признаков:* _____

15. *Изобретателем фотограмметрии считается* _____

16. *За начало осенней аэрокосмической съемки для почвенных исследований северо-востока Беларуси принята дата:* _____

17. *Полнота дешифрирования определяется через отношение:* _____

18. *Разработку технических средств для спектрометрической съемки в Беларуси возглавляет:* _____

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

4.1. Учебно-методическая карта по учебной дисциплине

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов УСР	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
	ДИСТАНЦИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ (48 ч.)	**22 (4 ДО)**			**22**		**Зачет**
1.	**Введение в дисциплину «Дистанционная спектрометрия/спектрометрия агроландшафтов»**	2					Устный опрос.
2.	**Спектрально-отражательные свойства компонентов ПТК**	2					Устный опрос.
3.	**Методология наземного спектрометрирования**	2					Устный опрос.
4.	**Постобработка результатов полевого спектрометрирования**	2			2		Устный опрос. Отчёт по лабораторным работам.
5.	**Спектральная аппаратура**	2					Устный опрос.

		4 (ДО)					
6.	**Дистанционная спектрометрия**	2					Устный опрос.
7.	**Методы цифровой фотограмметрической обработки спектральных данных**	2			4		Отчёт по лабораторных работам.
8.	**Геоинформационный анализ спектрометрических данных**	2			4		Отчёт по лабораторных работам.
9.	**Статистические методы анализа спектрометрических данных**	2			6		Отчёт по лабораторных работам.
10.	**Спектральные базы данных**	2			6		Отчёт по лабораторным работам.
11.	**Прикладные задачи дистанционного спектрометрирования агроландшафтов**	2					Устный опрос.

4.2. Рекомендуемая литература

Основная

1. Балдина, Е.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебник / Е.А. Балдина, И.А. Лабутина. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2021. – 269 с.

2. Давидович, Ю.С. Изменение спектральной отражательной способности сельскохозяйственных культур в зависимости от степени увлажнения почв / Ю.С. Давидович, Г.С. Литвинович, Ф.Е. Шалькевич // Геоматика: образование, теория и практика [Электронный ресурс]: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. геодезии и космоаэрокартографии и 85-летию фак. географии и геоинформатики БГУ, Респ. Беларусь, Минск, 20–22 нояб. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: А. П. Романкевич (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2019. – С. 111–114.

3. Давидович, Ю.С. Использование лабораторных измерений при исследовании спектральной отражательной способности сельскохозяйственных культур / Ю.С. Давидович // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках [Электронный ресурс]: материалы междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, 60-летию каф. физ. географии и образоват. технологий, 100-летию со дня рождения проф. О.Ф. Якушко, Минск, 24–26 марта 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; под общ. ред. П.С. Лопуха; редкол.: П.С. Лопух (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 674–679.

4. Давидович, Ю.С. Создание библиотеки спектральных эталонов по данным наземных спектрометрических измерений / Ю.С. Давидович, Л.В. Катковский // ГИС-технологии в науках о Земле [Электронный ресурс]: материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 13 нояб. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Н.В. Жуковская (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2019. – С. 103–107.

5. Дистанционное зондирование Земли: учебное пособие / В.М. Владимиров [и др.]; под общ. ред. В.М. Владимирова. – Москва: ИНФА-М; Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2021. – 196 с.

6. Дмитриев, Е.А. Математическая статистика в почвоведении: учебник / Е.А. Дмитриев; науч. ред. Ю.Н. Благовещенский. – Москва: ЛЕНАНД, 2023. – 334 с.

7. Казяк, Е.В. Результаты использования методов геоинформационного и статистического анализа для изучения спектрально-отражательных характеристик сельскохозяйственных культур Беларуси / Е.В. Казяк, Ю.С. Давидович, Н.А. Шестаков // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2022. – № 2. – С. 55–68.

8. Карпиченко, А.А. Математические методы в географии: электронный учебно-методический комплекс для специальностей: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление специальности: 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)»; 1-31 02 03 «Космоаэрокартография»; 1-33 01 02 «Геоэкология» / А.А. Карпиченко, Н.К. Чертко; БГУ, Фак. географии и

геоинформатики, Каф. почвоведения и геоинформационных систем. – Минск: БГУ, 2019. – 61 с.

9. Литвинович, Г.С. Комплекс аппаратуры и методы обработки спектральных данных для дистанционного мониторинга состояния природных объектов: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / Г.С. Литвинович; НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2024. – 24 с.

10. Ломако, А.А. Дисторсия фотоаппаратуры как фактор ухудшения качества сшивки и геопривязки регистрируемых с борта Международной космической станции изображений поверхности Земли / А.А. Ломако, Ю.С. Давидович, И.В. Рассказов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2023. – № 1. – С. 85–94.

11. Любимов, А.В. Дистанционные (аэрокосмические) методы комплексной оценки лесных ресурсов: учебное пособие / А.В. Любимов, С.В. Вавилов, А.В. Грязькин. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 144 с.

12. Малышев, В.Б. Децентрализованная база данных спектральных характеристик и параметров объектов земной поверхности / В.Б. Малышев, Б.Н. Фомин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16 – № 2. – С. 53–65.

13. Мартинов, А.О. Спектрально-оптические методы и алгоритмы обработки данных при дистанционном зондировании Земли: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / А.О. Мартинов; НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2021. – 27 с.

14. Наземные и дистанционные методы оценки состояния экосистем особо охраняемых природных территорий / Д.Г. Груммо [и др.]; под общ. ред. Д.Г. Груммо, А.В. Судника; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. Ботаники им. В.Ф. Купревича. – Минск: Беларуская навука, 2023. – 351 с.

15. Обуховский, Ю.М. Индикационное картографирование: электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Ю.М. Обуховский, П.В. Жумарь; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии. – Минск: БГУ, 2020. – 257 с.

16. От земных проблем до космических / П.В. Кучинский [и др.]. – Минск: РИВШ, 2021. – 364 с.

17. Романкевич, А.П. Введение в специальность «Космоаэрокартография»: учебные материалы для студентов I курса специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / А.П. Романкевич, В.Н. Пейхвассер, А.Р. Герман. – Минск: БГУ, 2021. – 32 с.

18. Словарь современных терминов. Геодезия, картография, геоинформатика, кадастр, дистанционное зондирование / МИИГАиК; сост. А.Е. Алтынов [и др.]. – Москва: МИИГАиК, 2019. – 368 с.

19. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие / А.Н. Шихов [и др.]; Пермский государственный национальный

исследовательский университет. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021 – 191 с.

20. Терехин, Э.А. Оценка пространственно-временных изменений в зеленой фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 138–148.

21. Топаз, А.А. Использование материалов многозональной съемки в географических исследованиях : учеб.-метод. материалы по курсу «Методы дистанционных исследований» для студентов специальностей 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-33 01 02 «Геоэкология», 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)» / А.А. Топаз, Ю.С. Давидович. – Минск: БГУ, 2022. – 29 с.

22. Топаз, А.А. Методы дистанционных исследований: электронный учебно-методический комплекс для специальностей: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-33 01 02 «Геоэкология», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)» / А.А. Топаз; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии. – Минск: БГУ, 2022. – 127 с.

23. Топаз, А.А. Радиометрическая и атмосферная коррекция космических снимков в программном комплексе ENVI: учеб.-метод. рекомендации по курсу «Цифровая обработка космических снимков» для студентов специальностей 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)» / А.А. Топаз, Ю.С. Давидович. – Минск: БГУ. – 28 с.

24. Топаз, А.А. Цифровая обработка космических снимков: электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / А. А. Топаз, Н. А. Шестаков; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии. – Минск: БГУ, 2023. – 95 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 94–95.

25. Фотограмметрия: электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. геодезии и космоаэрокартографии; сост. П.В. Жумарь. – Минск: БГУ, 2020. – 94 с.

26. Цифровое сельское хозяйство Республики Беларусь / под общ. ред. В.Г. Гусакова; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т систем. исслед. в АПК. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 553 с.

27. Шалькевич, Ф.Е. Тематическое дешифрирование: пособие / Ф.Е. Шалькевич, М.Ф. Курьянович. – Минск: БГУ, 2022. – 131 с.

Дополнительная

28. Создание электронной базы геоданных спектральных образцов агрокультур Беларуси на основе полевого спектрометрирования и материалов дистанционного зондирования Земли / Е.О. Хрущева [и др.] // ГИС-технологии в науках о Земле [Электронный ресурс]: материалы конкурса ГИС-проектов

студентов и аспирантов УВО Республики Беларусь, проведенного в рамках празднования Международного Дня ГИС 2015, Минск, 18 ноябр. 2015 г. / редкол.: Д.М. Курлович (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2015. – С. 32–37.

29. Андроников, В.Л. Аэрокосмические методы изучения почв / В.Л. Андроников. – М.: Колос, 1979. – 280 с.

30. Атрощенко, О.О. Дистанционные методы зондирования лесов и геоинформационные системы в лесном хозяйстве / О.О. Атрощенко, И.В. Толкач. – Минск: БГТУ, 2003. – 375 с.

31. Бауэр, М.Е. Спектральные методы идентификации и оценки состояния зерновых культур/ М.Е. Бауэр // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73. – № 6. – С. 185–201.

32. Беляев, Б.И. Исследование сезонной динамики спектрально-отражательных свойств агрокультур Беларуси на основе полевого спектрометрирования и материалов дистанционного зондирования Земли / Б.И. Беляев, Е.О. Казяк, Е.О. Хрущева // Земля Беларуси. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

33. Беляев, Б.И. Приборы и методы аэрокосмического дистанционного зондирования природных объектов / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский, В.А. Сосенко // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 3. – С. 38–47.

34. Беляев, Ю.В. Оптико-электронные средства дистанционного изучения природных и искусственных образований в диапазоне длин волн 0,35–1,05 мкм: автореф. дис. … канд. техн. наук: 01.04.01 / Ю.В. Беляев; НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2005. – 20 с.

35. Беляев, Б.И. Оптическое дистанционное зондирование / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский. – Минск: БГУ, 2006. – 455 с.

36. Вандербилт, В.С. Поляризация света, рассеянного растительностью / В.С. Вандербилт, Л. Грант, К.С.Т. Дотри // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73. – № 6. – С. 72–85.

37. Виноградов, Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем / Б.В. Виноградов. – Москва: Наука, 1984. – 297 с.

38. Выгодская, Н.Н. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности / Н.Н. Выгодская, И.И. Горшкова. – Ленинград: Гидрометиздат, 1987. – 245 с.

39. Гониофотометр для измерения коэффициентов спектральной яркости и спектров пропускания / И.И. Бручковский [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88. – № 2. – С. 303–310.

40. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М. Дейвис [и др.]. – М.: Недра, 1983. – 415 с.

41. Дистанционные методы и аппаратура для исследования Земли из космоса / Б.И. Беляев [и др.] // Наука и инновации. – 2013. – № 5. – С. 15–18.

42. Исследование влияния строения растительных объектов на степень поляризации их излучения / Б.И. Беляев [и др.]. – Минск: БГУ, 1991. – 49 с.

43. Караванова, Е.И. Оптические свойства почв и их природа / Е.И. Караванова. – Москва, 2003. – 153 с.

44. Карманов, И.И. Спектральная отражательная способность и цвет почв как показатели их свойств / И.И. Карманов. – М.: Колос, 1974. – 351 с.

45. Классификация почв по степени эродированности и влажности на основе данных спектрометрирования / Е.Н. Горбачева [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28 февраля 2011 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2011. – С. 37–38.

46. Книжников, Ю.Ф. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений: учеб. пособие / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова – М.: МГУ, 1991. – 205 с.

47. Книжников, Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: для студентов учреждений высшего профессионального образования / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. – 2-е изд. – Москва: Издательский центр «Академия», 2011. – 416 с.

48. Кравцов, С.Л. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям) / С.Л. Кравцов, Д.В. Голубцов, Е.Н. Лисова // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 1. – С. 79–91.

49. Кравцова, В.И. Космические методы исследования почв: учеб. пособие / В.И. Кравцова. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 190 с.

50. Кринов, Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е.Л. Кринов // Москва: Изд-во АН СССР, 1947. – 271 с.

51. Кронберг, П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии / П. Кронберг. – М.: Мир, 1988. – 343 с.

52. Лимонов А.Н. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: Учебник для вузов / А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова. – М.: Академический проект, 2018. – 296 с.

53. Меньшиков, В.А. Многофункциональная космическая система Союзного государства / В.А. Меньшиков, М.И. Макаров, С.В. Пушкарский. – Москва: НИИ КС, 2007. – 480 с.

54. Методы дистанционных исследований в геологии и географии: учебн. пособ. / Хадыева В.С. [и др.]; под общ. ред. В.С. Хадыевой. – Минск, 2015. – 256 с.

55. Обуховский, Ю.М. Аэрокоосмические исследования ландшафтов Беларуси / Ю.М. Обуховский, В.Н. Губин, Г.И. Марценкевич. Мн.: Изд. Навука и тэхніка, 1995 – 174 с.

56. Обуховский, Ю.М. Ландшафтная индикация: учеб. пособие / Ю.М. Обуховский. – Мн.: БГУ, 2008. – 254 с.

57. Орлов, Д.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов/ Д.С. Орлов, И.И. Суханова, М.С. Розанова. – М.: Издательство МГУ, 2001. – 176 с.

58. Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве: сб. науч. Тр. / АН УССР. Институт физиологии растений и генетики; редкол.: Кочубей С.М. (отв. ред.) и др. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 152 с.

59. Рис, У. Основы дистанционного зондирования / У. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.

60. Роговец, А.В. Обработка спектров и изображений при оптическом дистанционном зондировании: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / А.В. Роговец; НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2012. – 26 с.

61. Савиных, В.П. Визуально-инструментальные исследования Земли с пилотируемого космического комплекса / В.П. Савиных. – Москва: Недра, 1991. – 109 с.

62. Сергеева, О.С. Использование спектральной отражательной способности почв и агрофитоценозов для мониторинга плодородия почв: автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.02.13 / О.С. Сергеева; Тюменская сельскохозяйственная академия. – Тюмень, 2011. – 18 с.

63. Сизиков, А.С. Создание отечественного комплекса «Визир» для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов / А.С. Сизиков, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман // ВіТР. Безопасность и Пожарная Техника – 2018. – Т. 50. – № 2. – С. 28–37.

64. Смирнов, Л.Е. Аэрокосмические методы географических исследований / Л.Е. Смирнов. – СПб.: Издательство Санкт-Петербурского университета, 2005. – 348 с.

65. Спектральные отражательные свойства почв: аналитический обзор / Беляев Б.И. [и др.]; под ред. Беляева Б.И. – Минск: Белорусский филиал ВНИИТЭИагропром, 1991. – 58 с.

66. Спектральные приборы для аналитических применений. Перспективные разработки / под ред. Е.С. Воропая. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. – 196 с.

67. Спектрометрирование ландшафтов: учебн. пособ. / Алтынов А.Е. [и др.]; под общ. ред. А.Е. Алтынова. – Москва: Изд-во МИИГАиК, 2010. – 120 с.

68. Спектроскопия плазмы и природных объектов / под ред. В.И. Архипенко, В.С. Буракова, А.Ф. Чернявского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 488 с.

69. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев [и др.]. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

70. Стефанович, А.В. Спектральная отражательная способность почв и её влияние на их изобразительные свойства на космических снимках / А.В. Стефанович, М.Ф. Курьянович, Ф.Е. Шалькевич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 января 2013 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2013. – С. 81–83.

71. Сутырина, Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие / Е.Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.

72. Топаз, А.А. Цифровая обработка космических снимков в программном комплексе ENVI: учеб.-метод. пособие / А.А. Топаз, Е.В. Казяк. – Минск: БГУ, 2018. – 79 с.

73. Физические основы дистанционного зондирования / Адзерихо К.С. [и др.]; под общ. ред. К.С. Адзерихо. – Минск: Университетское, 1991. – 294 с.

74. Цикман, И.М. Системные параметры и методики калибровки спектрорадиометров для дистанционной диагностики природных и искусственных объектов в диапазоне 0,35–2,5 мкм: автореф. дис. … канд. техн. наук: 01.04.01 / И.М. Цикман; НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2013. – 24 с.

75. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.

76. Черепанов, А.С. Вегетационные индексы / А.С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.

77. Черепанов, А.С. Спектральные свойства растительности и спектральные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.

78. Чертко, Н.К. Математические методы в географии: учебно-методическое пособие / Н.К. Чертко, А.А. Карпиченко. – Минск: БГУ, 2009. – 199 с.

79. Шалькевіч, Ф.Е. Узаемасувязь тону адлюстравання глеб і іх спектральнай адбівальнай здольнасці / Ф.Е. Шалькевіч, У.Ц. Сяргеенка // Весці АН БССР. Сер. с.-г. навук. – 1988 г. – № 3. – С. 24–26.

80. Шалькевич, Ф.Е. Влияние влажности и содержания гумуса в почвах на тон фотоизображения пахотных земель / Ф.Е. Шалькевич // Почвоведение и агрохимия. – 1986. – № 22. – С. 37–45.

81. Шалькевич, Ф.Е. Использование аэрометодов при изучении почв (на примере Белорусского Полесья): автореф. дис. … канд. биолог. наук: 06.01.03 / Ф.Е. Шалькевич; Белорусский научно-исследовательский института почвоведения и агрохимии. – Москва, 1981. – 26 с.

82. Шалькевич, Ф.Е. Методы дистанционных исследований: лабораторный практикум / Ф.Е. Шалькевич, А.А. Топаз. – Минск: БГУ, 2012. – 63 с.

83. Шалькевич, Ф.Е. Методы аэрокосмических исследований: курс лекций / Ф.Е. Шалькевич. – Минск: БГУ, 2006. – 161 с.

84. Шалькевич, Ф.Е. Составление тематических карт на основе дешифрирования аэрокосмических снимков: учебн.-метод. пособие / Ф.Е. Шалькевич, Р.А. Жмойдяк, А.А. Топаз. – Минск: Изд-во БГУ, 2000. – 40 с.

85. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – Москва: Техносфера, 2013. – 592 с.

86. Шупляк, В.И. Исследование спектрополяризационных характеристик излучения, отраженного растительностью: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / В.И. Шупляк; БГУ. – Минск, 1991. – 16 с.

87. Geiger, B. Reflection propeties of vegetation and soil / B. Geiger, M. von Shonermark, H.P. Roser. – Berlin: Wissenshaft und Technik Verlag, 2004. – 352 p.

88. Thenkabail, P.S. Hyperspectral remote sensing of vegetation / P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. – Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. – p. 703.
89.

4.3. Электронные ресурсы

90. Геоинформационные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gis.by/ru/tech/bka. – Дата доступа: 22.03.2024.
91. Геопространственное агентство ИННОТЕР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://innoter.com/sputniki/landsat-8/. – Дата доступа: 20.03.2024.
92. Республиканское дочернее аэрофотогеодезическое унитарное предприятие БелПСХАГИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://beldzz.by/distantsionnoe-zondirovanie-zemli/aerosyemka-s-samolyeta.php. – Дата доступа: 21.03.2024.