

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
(МИИГАиК)**

На правах рукописи



Зареи Саджад

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТОВ ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Малинников В. А.

МОСКВА 2018

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ РЕСУРСОВ	
1.1. Аналитический обзор и опыт картографирования ландшафтов территории по данным спутникового термического зондирования.....	14
1.2. Основные характеристики искусственных спутников Земли и их аппаратуры	24
1.3. Программные средства обработки материалов спутниковой съемки	30
1.4. Методы расчета оценочных многокритериальных показателей.....	32
1.5. Современное ландшафтное представление провинции Хузестан и её географические особенности	34
1.5.1. Климат.	36
1.5.2. Растительность.....	39
1.5.3. Водоемы суши.	41
1.5.4. Характеристика сельскохозяйственных земель.	43
1.6. Выводы по первой главе.....	44
2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ	
2.1. Обобщенная структурная схема использования снимков Landsat для картографирования ландшафтов.....	46
2.2. Радиометрическая коррекция спутниковых данных.	48
2.3. Атмосферная коррекция спутниковых данных.....	49

2.4. Особенности предварительной обработки данных, получаемых со спутника Landsat 7.	50
2.5. Построение мозаики снимков картографируемой территории средствами ERDAS.	51
2.6. Расчет вегетационного индекса NDVI и температуры земной поверхности.	52
2.6.1. Построение растровых изображений нормализованного относительного индекса растительности NDVI.	52
2.6.2. Переход от излучения земной поверхности к радиационной температуре.	54
2.6.3. Алгоритмы восстановления или коррекции данных Landsat 8.	56
2.7. Моделирование рельефа земной поверхности в границах провинции Хузестан	61
2.8. Анализ сезонной динамики полей температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI.	64
2.9. Выводы по второй главе	83
3. СОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ КАРТ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ЛАНДШАФТНЫХ РЕСУРСОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК.....	85
3.1. Создание слоев картографической основы	85
3.2. Создание слоев специального содержания, отражающих данные спутникового зондирования.....	88
3.3. Создание слоя специального содержания, отражающего данные полевых наблюдений.....	93
3.4. Создание слоев элементов специального содержания, отражающих результирующие многокритериальные показатели.....	94
3.4.1. Формализованная классификация элементарных поверхностей по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.....	94

3.4.2. Формализованная классификация единиц административного деления провинции Хузестан по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.....	97
3.4.3. Оценка распространенности территорий, различных видов землепользования природно-ландшафтных ресурсов.....	100
3.5. Методические положения оценочного геоинформационного картографирования ресурсного потенциала природно-территориальных комплексов по данным спутниковой съемки сезонной динамики радиационной температуры и вегетативного индекса NDVI.....	107
3.6. Рекомендации по картографическому обеспечению спутникового мониторинга условий сельскохозяйственного использования территорий.....	115
3.7. Выводы по третьей главе.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения на русском языке

ГИС	–	Геоинформационная Система
ДЗЗ	–	Дистанционное Зондирование Земли
ДДЗЗ	–	Данные Дистанционного Зондирования Земли
ВАК	–	Высшая Аттестационная Комиссия
КА	–	Космические Аппараты
США	–	Соединённые Штаты Америки
ИК	–	Инфракрасный
ТЗП	–	Температура Земной Поверхности

Сокращения на иностранных языках

NDVI	–	Normalized Difference Vegetation Index Нормализованный Дифференциальный Вегетационный Индекс
Iind	–	Integral Indicator Интегральный Индикатор
ERDAS	–	Earth Resources Data Analysis System Система Анализа Данных о Земных Ресурсах
GIS	–	Geographic Information System Система Географической Информации
ENVI	–	Environment for Visualizing Images Среда для Визуализации Изображений
RGB	–	Red, Green, Blue Красный, Зеленый, Синий
MSS	–	Multi Spectral Scanner

		Мультиспектральный Сканер
ETM	–	Enhanced Thematic Mapper Расширенный Тематический Картограф
TM	–	Thematic Mapper Тематический Картограф
OLI	–	Operational Land Imager Прибор Съёмки Поверхности Земли
TIRS	–	Thermal InfraRed Sensor Тепловой Инфракрасный Сенсор
NIR	–	Near-Infrared Ближний Инфракрасный
ESRI	–	Environmental Systems Research Institute Институт Исследования Систем Окружающей Среды
FLAASH	–	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes Быстрый Атмосферный Анализ Прямой Видимости Гиперкубов
SLC	–	Scan Line Corrector Корректор Линии Сканирования
TES	–	Temperature Emissivity Separation Разделение Излучательной Способности и Температуры
SW	–	Split Window Расщеплённое Окно
ASTER	–	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Расширенный Космический Термический Эмиссионный и Отражательный Радиометр
DC	–	Duty Cycle Рабочий Цикл
GPS	–	Global positioning System Глобальная Система Позиционирования

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современное картографирование ландшафтов, выполняемое по материалам спутникового зондирования, все в большей степени становится по технологии геоинформационным, по содержанию – оценочным, по назначению – направленным на поиск и практическую реализацию методов повышения эффективности эксплуатации природно-ландшафтных ресурсов. Рассматривая использование земель в качестве средств производства сельскохозяйственной продукции, в данном исследовании особое внимание уделено показателям биопродуктивности угодий – природным процессам, определяющим условия вегетации растений и накопления фитомассы. Общеизвестно, что культивирование определенных агрокультур производится в соответствии с наблюдаемыми диапазонами значений оптимума влагонасыщенности и температуры почвенных отложений, температуры приземной атмосферы и фотосинтетически активной радиации.

Совокупная реакция растительных сообществ на качество среды обитания фиксируется параметрами нормализованного вегетационного индекса NDVI, получаемого по данным дистанционного зондирования из космоса и сопоставляется с урожайностью выращиваемой сельскохозяйственной продукции [82, 125, 134]. Вместе с тем в пределах определенной территории, погодные условия от года к году разнятся, причем не редко кардинально. Поэтому является актуальной разработка методики автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования с целью геоинформационного картографирования ландшафтов, основанного на использовании интегрального показателя- индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов. Исследование выполнено на примере аридного региона, расположенного на территории Ирана. Выбранный для проведения исследования аридный регион, является ярчайшим примером хрупкой экосистемы, подверженной значительным естественным (внешним) и

антропогенным нагрузкам, для которой критически важна реализация мер по оценке состояния природных ресурсов и выработке системы рационального и устойчивого управления данными ресурсами. Из чего следует, что одной из важных задач ГИС сопровождения мониторинга природопользования является накопление базы геоданных за достаточно представительный ряд лет и представление интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов (*Iind*) серией оценочных карт, отражающих различные принципы деления оцениваемой территории [96,117,131]. Таким образом, очевидна необходимость разработки принципов и методики построения на основе данных космического зондирования Земли из космоса, базы геоданных, включающей формализованное и не формализованное деление территории картографирования, описание выделенных операционных единиц параметрами сезонной изменчивости, температуры земной поверхности, и сезонной изменчивости нормализованного индекса растительности с постоянным наращиванием годовых массивов информации.

Цель диссертационной работы заключается в разработке методики автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования для геоинформационного картографирования ландшафтов, основанного на использовании интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующей практики сбора и обработки данных ДЗЗ с космических аппаратов природно-ресурсного назначения.
2. Анализ существующей практики автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования природно-ландшафтных ресурсов в среде ГИС.
3. Разработка методики формализованного деления исследуемой территории на типы элементарных поверхностей (в соответствии с требованиями к сельхозугодьям), параметризуемые сезонной изменчивостью значений

вегетационного индекса NDVI и радиационной температуры земной поверхности.

4. Создание геобазы данных, включающей табличные и картографические представления динамики *Iind*, а также частных показателей – вегетационного индекса NDVI и радиационной температуры земной поверхности – за период 2011 – 2016 гг.
5. Разработка методики составления оценочных карт отражающих варианты представления интегрального индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов провинции Хузестан Ирана для элементарных поверхностей, для территорий определенных видов землепользования, для административных районов.

Объектом диссертационного исследования являются методики автоматизированного дешифрирования разновременных многозональных материалов спутникового зондирования с целью геоинформационного картографирования ландшафтов, основанного на использовании интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Предметом исследования является территориально-природные образования – элементарные участки земной поверхности (преимущественно являющиеся элементарными морфологическими единицами ландшафтов), единицы административного деления провинции Хузестан исламской республики Иран, а также территории определенных видов землепользования, исследованные показателями сезонной динамики, радиационной температуры земной поверхности, нормализованного вегетационного индекса растительных сообществ, отражающих биопродуктивность растительного компонента природно-территориальных образований и показатели распространенности территорий определенных видов землепользования, рассчитываемые с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Материалы и методы. Исходными данными для проведения экспериментальных исследований послужили материалы метеостанций

провинции Хузестан Ирана (за период 2011 – 2015 гг.); материалы космической съемки со спутника Landsat 7 (2011 – 2012гг.); материалы космической съемки со спутника Landsat 8 (2013 – 2016гг.) и материалы полевых изысканий за период 2016г. (июль и август). В работе также использовались сведения о климате, водоемах суши, характеристике сельскохозяйственных земель и распространении растительности провинции Хузестан.

При решении задач диссертационного исследования использовались методы дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологии. В диссертационной работе также использовались методики обработки и автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования, геоинформационного картографирования ландшафтов, расчета интегрального показателя (индикатора) состояния природно-ландшафтных ресурсов и методики расчета индексов температуры поверхности Земли и NDVI по материалам многоспектральных космических съемок. При проведении вычислительных экспериментов применялись программные комплексы ERDAS IMAGINE, ENVI, ArcGIS и «Признак».

Основные результаты диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Принципы и методические положения формализованного деления изучаемой территории на типы элементарных поверхностей в соответствии с требованиями к сельхозугодиям и параметризации данных типов поверхностей сезонной изменчивостью вегетационного индекса NDVI и нормированной радиационной температуры земной поверхности, определяемых по данным ДЗЗ из космоса.
2. Методика автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования с целью геоинформационного картографирования ландшафтов, основанного на использовании интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов.

3. Обобщенная информационная методика оценочного картографирования ландшафтов, выполняемого с использованием интегрального индикатора природно-ресурсного потенциала элементарных поверхностей (на примере провинции Ирана Хузестан), с представлением *Iind* по административным районам провинции и по территориям определенных видов землепользования.
4. Основные требования к актуализации и накоплению базы геоданных при мониторинге состояния природно-ландшафтных ресурсов с использованием материалов спутникового зондирования земной поверхности, включая автоматизированное дешифрирование космических изображений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Автором впервые разработана методика автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового термического зондирования Земли, позволяющая вычислять значения индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов по данным многозональной космической съёмки в видимом и тепловом диапазонах спектра.

Автором впервые произведено формализованное деление территории провинции Хузестан исламской республики Иран с выделением 25 формализованных типов морфологических образований (операционных единиц), отличающихся по экспозиции и углу падения склона согласно требованиям к сельскохозяйственным угодьям.

На основании сравнительного анализа формализованных типов морфологических образований определена независимость сезонной изменчивости их радиационных температур и значений вегетативного индекса NDVI, фиксируемых на мультиспектральных изображениях Landsat с 16-суточным интервалом космической съёмки (с мая по сентябрь).

На основе результатов автоматизированного дешифрирования материалов тепловой спутниковой съёмки и цифрового моделирования тепловых полей,

впервые составлены авторские оригинальные карты отражающие различные виды землепользования провинции Хузестан исламской республики Иран.

Практическая значимость диссертационной работы.

Провинция Хузестан представлена территориями, отличающимися по ресурсному потенциалу, который может быть охарактеризован интегральной характеристикой, включающей главным образом показатели сельскохозяйственного использования земель. Поэтому, соответствующая оценочная карта интегральных характеристик отражает эффективность эксплуатации природно-ландшафтных ресурсов в целом. Кроме того, другие оценочные карты могут представлять, например, долевое участие в интегральном показателе угодий пастбищного животноводства, пахотных площадей выращивания зерновых агрокультур, фруктовых плантаций и т.д. Такая природно-ресурсная информация позволяет составлять схемы территориального планирования, предусматривающие инженерное обустройство землевладений в границах, как отдельных сельских муниципальных образований, так и в пределах отдельных хозяйствующих субъектов – природно-хозяйственных систем.

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы достигается:

- применением корректных алгоритмов статистической обработки построенных автором температурных и тепловых полей;
- дисперсионным анализом экспериментальных данных, основанном на использовании критерия Шеффе, предусматривающим формулирование критериев правомерности принятия нулевой или альтернативной гипотезы;
- использованием данных инструментальных режимных метеонаблюдений;
- проведением автором компьютерных экспериментов по реализации геоинформационного моделирования.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований были доложены на международных научно-практических конференциях: «Геодезия,

картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 11–13 Ноября, 2015); «Всероссийская научно-практическая конференция «Совершенствование средств и методов сбора, обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения» (Санкт-Петербург, 21–22 Апреля, 2016); «студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017 в г. Севастополе» (Москва, 10–14 Апреля, 2017).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в **11** публикациях, из которых **8** представлены в рекомендованных ВАК России и/или входят в базы данных SCOPUS и Web of Science журналах и 3 научных докладов опубликованных в трудах международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Материал работы изложен на 136 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 25 рисунков, в списке литературы 171 наименований, из которых 97 научных статей зарубежных авторов.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в подготовке диссертационной работы: своему научному руководителю заведующему кафедрой космического мониторинга и экологии, д.т.н. профессору Малинникову Василию Александровичу; заведующему кафедрой географии д.г.н Братков В.В.; всему коллективу кафедры космического мониторинга и экологии; за помощь в организации полевых работ и консультации: к.т.н. Паниди Е.А и к.г.н Щербаков В.М.

1. СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ РЕСУРСОВ

1.1. Аналитический обзор и опыт картографирования ландшафтов территории по данным спутникового термического зондирования

Все объекты с температурой выше абсолютного нуля излучают электромагнитное излучение. Земля имеет среднюю температуру около 300 К, а её пик электромагнитного излучения расположен в тепловом инфракрасном диапазоне, около 9,7 мкм [121,135]. Земля поглощает большую часть поступающего солнечного излучения, и соответствующее количество излучается на более длинных волнах. Датчики дистанционного зондирования, имеют возможность регистрировать это излучение теплового инфракрасного диапазона. Таким образом, датчики теплового инфракрасного диапазона позволяют получать изображения теплового излучения объектов на земной поверхности. Такие снимки могут отображать кинетическую температуру объектов при разрешении соответствующего датчика. Наиболее известными продуктами, полученными из изображений теплового инфракрасного диапазона, являются температура поверхности земли и температура поверхности моря [78]. Однако тепловые данные имеют гораздо больший потенциал, чем просто вывод этих стандартных продуктов. Эти данные позволяют оценивать термические аномалии (лесные пожары, угольные пожары, тепловое загрязнение, утечки энергии в зданиях, воспаленные области в тепловизионных изображениях), анализ состояния природопользования территорий, анализ природных ресурсов, анализ состояния влаги или даже мониторинг производительности машины в промышленных приложениях и оценка тепловой динамики в разных масштабах.

Получение космических снимков с различными свойствами обеспечивается методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Космические снимки разного пространственного разрешения позволяют исследовать объекты поверхности Земли, оценивать взаимодействие данных объектов. Кроме того, ДЗЗ обеспечивает использование разных спектральных диапазонов – видимого, ближнего, среднего и теплового инфракрасного, радиоволнового. Среди них данные теплового инфракрасного диапазона занимают особое место. Данные тепловой инфракрасной области получены множеством наземных, бортовых и космических средств дистанционного зондирования. В широком спектре полей применяется тепловое инфракрасное дистанционное зондирование, например, для оценки общей динамики температуры суши или моря, обнаружения лесных, угольных и торфяных пожаров, картирования островов городского тепла или загрязнения тепловой воды, дифференциации геологических поверхностей, анализа влажности почвы, геоинформационное картографирование ландшафтов, и др.

В середине XX века активно использованы данные теплового инфракрасного диапазона для инженерных задач в науках о Земле [15,63]. В 1960 году были получены первые снимки Земли в тепловом инфракрасном диапазоне с американского метеорологического спутника TIROS-1. Сенсоры спутников TIROS-1 и 2, впервые обеспечивали использование снимков теплового инфракрасного дистанционного зондирования Земли для решения метеорологических задач. Далее с 1962 года появились спутники серии «Космос», которые использованы для космических исследований на основе советской программы. С использованием спутников «Космос» была создана экспериментальная метеорологическая система «Метеор». С 1960-х гг, материалы теплового инфракрасного диапазона используются для изучения

антропогенных и природных объектов и процессов земной поверхности [15,139,140,141].

Технологии получения спутниковых данных в тепловом инфракрасного диапазона совершенствовались как в отношении пространственного разрешения, так и температурного. Например, снимки спутника NOAA в начале 70-х годов, характеризовались пространственным разрешением 6 км при температурном разрешении 1°C; затем сканирующая система AVHRR спутника NOAA позволила получать снимки теплового инфракрасного диапазона с пространственным разрешением 1,1 км и температурным 0,1 – 0,2 °C. Появление технологии получения тепловых снимков привело к разработке радиометров, позволяющих регистрировать тепловое излучение Земли в нескольких узких спектральных каналах в диапазоне от 8 до 14 мкм. Использование нескольких спектральных каналов теплового диапазона обеспечивает развитие различных направлений исследования Земли, например, определение температуры поверхности Земли и океана.

Большинство съёмочных систем получает снимки низкого пространственного разрешения, (1000 м и ниже). Некоторые съёмочных систем получают снимки с пространственным разрешением от 500 до 1000 м. Снимки систем TM, ETM+, MSS, TIRS (Landsat 8), MTI, ASTER, VIIRS имеют пространственное разрешение выше 500 м. Среди них три системы (ETM+, ASTER, TIRS) характеризуются пространственным разрешением 100 м и выше. По данным, получаемым этими сенсорами, определяются температуры поверхности океана и суши.

Американская программа Landsat появилась в 1972 году, с этого времени было запущено восемь спутников. Запуск нового спутника Landsat-8 (проект LDCM – Landsat Data Continuity Mission) состоялся в феврале 2013 г. Сканер теплового диапазона TIRS (Thermal Infrared Sensor) ведёт съёмку в двух каналах

10,6 – 11,2 мкм и 11,5 – 12,5 мкм с пространственным разрешением 100 м. Следует отметить важнейший факт – снимки системы ETM+ характеризуются наиболее высоким среди имеющихся в открытом доступе тепловых космических снимков пространственным разрешением – 60 м. Пространственное разрешение снимков в тепловом канале системы TM – 120 м, системы TIRS – 100 м, временное разрешение снимков систем TM, ETM+ и TIRS – 16 суток. Эти параметры позволяют изучать территории регионального уровня.

Можно заметить, что с момента появления первых космических систем тепловой съёмки произошло существенное улучшение их технических характеристик. Однако до сих пор остаётся нерешённой задача тепловой космической съёмки сверхвысокого разрешения, а также реализации возможности изучения суточной динамики интенсивности теплового излучения по снимкам высокого разрешения. В настоящее время наилучшим пространственным разрешением в тепловом диапазоне характеризуются снимки системы ETM+ (хотя с мая 2003 года они имеют пропуски данных) – 60 м. Самое высокое пространственное разрешение качественных данных – 90 м (система ASTER) и 100 м (система TIRS) [83,93,101]. Такого пространственного разрешения достаточно для решения картографирования ландшафтов.

Наиболее развиты исследования на глобальном уровне с применением снимков низкого пространственного разрешения (1 км и ниже) (как MODIS, AVHRR). Преимущество тепловых снимков таких систем, в высокой повторяемости съёмки, большом количестве съёмочных каналов, однако при этом они характеризуются не слишком высоким пространственным разрешением, недостаточным для изучения внутренних пространственно-временных неоднородностей геосистем. С другой стороны, низкое

пространственное разрешение даёт возможность выполнения исследования взаимодействия исследуемого объекта и окружающих объектов [84,93].

Тепловой инфракрасный диапазон охватывает зону спектра 3 – 14 мкм. В среднем инфракрасном диапазоне (1 – 3 мкм) фиксируется отраженное инфракрасное излучение земной поверхности, в большом диапазоне (14 – 1000 мкм) фиксируется излучение атмосферы, а не земной поверхности. Окна прозрачности атмосферы для теплового инфракрасного излучения находятся в диапазонах 3 – 5 мкм и 8 – 14 мкм, но максимум теплового излучения земной поверхности находится в диапазоне 10 – 12 мкм. Тепловые космические снимки обеспечивают особую информацию о отображении теплового излучения объектов земной поверхности. Все природные и антропогенные объекты на поверхности Земли имеют собственный поток теплового излучения, что обеспечивает возможность их регистрации в тепловом инфракрасном диапазоне. Тепловые и излучательные свойства объектов земной поверхности появляются только на тепловых снимках. Пиксели тепловых космических снимков принимают яркости, которые являются производной от величины интенсивности теплового излучения. При этом объекты земной поверхности могут иметь одинаковую температуру, но излучать с разной интенсивностью. Излучательной способностью является способность излучения энергии объектов на различных длинах волн [65]. Измерение излучательной способности выполнить не легко, потому что она зависит от физических свойств объектов. Яркость пикселей тепловой съемки, зависит от интенсивности теплового излучения и излучательной способности. Но прямой связи между значениями яркости на снимке, и интенсивности теплового излучения объектов земной поверхности, по причине необходимости учитывания излучательной способности объектов земной поверхности, и параметры атмосферы, находящейся между объектом земной поверхности и

аппаратурой, регистрирующей его излучение [44]. Интенсивность теплового излучения объектов может быть выражена через их температура.

Для извлечения значений температуры из тепловых инфракрасных снимков необходимо знать параметры состояния атмосферы исследуемой территории, и для составления уравнений температуры, необходимо иметь данные об интенсивности теплового излучения. Многие работы выполнены с целью разработки алгоритмов извлечения значений температуры из тепловых снимков [104,127,133,144]. Результат применения тепловых космических снимков сильно зависит от применяемого алгоритма расчета температур объектов, исходных данных съёмки и физических свойств исследуемой территории [139,140].

В тоже время следует отметить, что интенсивность теплового излучения объектов земной поверхности, зависит от их физических и химических характеристик, от особенностей биохимических процессов, которыми характеризуются природные объекты, от характеристик материалов антропогенных объектов. Эти свойства дают важную качественную информацию, что определяет принципиальную возможность выявления на тепловых космических снимках географических объектов, в том числе природных и антропогенных объектов [126].

Данные теплового инфракрасного диапазона обеспечивают мониторинг природных и антропогенных процессов на глобальном и региональном уровне. Это, в первую очередь, мониторинг опасных явлений и процессов, например, прогноз землетрясений по наличию участков повышенной интенсивности теплового излучения [50], лесных пожаров [1,10], исследование зон современного вулканизма [109]. К задачам мониторинга относится и изучение изменения состояния растительного покрова [58]. Кроме указанных направлений, развивается использование тепловых снимков для

картографирования ландшафтных единиц на глобальном уровне. Так например, в работе [14], показана принципиальная возможность выделения физико-географических зон по состоянию растительных покровов и температуры земной поверхности. Одним из наиболее перспективных направлений использования тепловых снимков космических является изучения ландшафтов.

Проведенные исследования тепловых и излучательных свойств растительного покрова и природных ландшафтов подтвердили высокую информативность тепловых космических снимков для исследования растительного покрова как компонента геосистем. Съёмка с авиационных сенсоров использована в работах [51,52], где с её помощью изучалась неравномерность интенсивности теплового излучения ландшафтов Южного Прибайкалья (пространственное распределение радиационной температуры подстилающей поверхности разделено на 4 типа, различающиеся по температуре и в амплитуде её колебаний; использование при анализе ландшафтно-климатического подхода позволило выделить эти типы на изучаемой территории). Тепловые снимки применяются для изучения структурно-функциональной организации ландшафта, для изучения радиационного баланса ландшафтных единиц разных иерархических уровней [32,59,115].

Значительную часть научных работ по теме исследования природных и антропогенных территорий по тепловым космическим снимкам занимают различные варианты моделирования тепловых характеристик земной поверхности. Много внимания исследователи обращают на изучение связи мощности растительного покрова и интенсивности теплового излучения – при сравнении тепловых инфракрасных снимков и изображений нормализованного разностного вегетационного индекса, вычисляемого на основе данных красного

и ближнего инфракрасного каналов (вегетационный индекс NDVI), всегда обнаруживается ярко выраженная обратная связь. Эту связь оценивают чаще всего через анализ изображений температуры земной поверхности ТЗП и NDVI [111,133]. Использование NDVI совместно с ТЗП позволяет получить дополнительную информацию о поверхности Земли, такую как состояние растительных покровов, суммарное испарение и влажность почвы (особенно это касается территорий с разреженным растительным покровом). Встречаются примеры создания алгоритмов обработки многозональных данных, включающих в себя использование нескольких математических моделей, для оценки связи интенсивности теплового излучения и характеристик поверхности Земли.

Обозначим некоторые проблемы, возникающие при изучении объектов земной поверхности по тепловым космическим снимкам:

1. Недостаточно развита методология применения снимков теплового инфракрасного диапазона для изучения природных территориальных комплексов.

2. Большинство исследований, использующих снимки теплового инфракрасного диапазона, ориентировано на изучение территорий планетарного или крупнорегионального масштаба, следовательно, используемые снимки характеризуются пространственным разрешением 1 км и менее. В связи с этим, одна из задач данной работы – обосновать целесообразность применения тепловых космических снимков для решения ландшафтных картографических задач.

3. Относительно слабое распространение методик картографирования географических объектов (картографирование ландшафтов, структура растительного покрова, характер использования безлесных пространств,

дифференциация геосистем в зависимости от абсолютной высоты и экспозиции склонов).

При этом, необходимо, чтобы извлекаемые данные были географически интерпретируемыми, поэтому важной задачей является разработка технологии сбора материалов, в том числе полевых, для уточнения результатов картографирования. Обозначенные задачи решаются в рамках центральной диссертационной задачи – разработки методики дешифрирования по тепловым космическим снимкам природных территориальных комплексов и применения полученной информации в географических исследованиях.

Одной из особенностей геоинформационного картографирования является возможность моделирования свойств компонентов ландшафта и динамики их изменения, представляя совокупность явлений некоторой интегральной характеристикой. Основная цель выполнения автоматизированного дешифрирования заключается в картографическом представлении многокритериального показателя, отражающего полуденную температуру земной поверхности ТЗП и фотосинтетическую активность листового аппарата растительных сообществ (вегетационный индекс NDVI) разных типов территории. Полученную информацию при тепловом дистанционном зондировании Земли можно использовать для исследования пространственно-временной динамики ландшафтного покрова и когда температура земной поверхности ТЗП является индикатором явлений и объектов, скрытых от непосредственного наблюдения [16]. Наиболее важный метод, который применяется для целей ландшафтного картографирования на основе временной динамики являются методикой дешифрирования разносезонных тепловых космических снимков можно применять для целей ландшафтного картографирования на основе временной динамики [3]. Картографирование является эффективным методом изучения

пространственного потенциала и оценки динамики растительного покрова [17]. Новые методы составления карт с использованием автоматизированного дешифрирования космоснимков изменили общепринятую технологию картографирования [35].

Использование дистанционного зондирования для целей картографирования ландшафтов становится обширным, о чем свидетельствует количество ссылок, которые можно привести [89,91,94,98,107,108], но в исследованиях картографирования ландшафтов мало использовалось тепловые инфракрасные данные ДЗ. В исследованиях, которые использовали тепловые инфракрасные данные ДЗ для изучения конкретных аспектов связанных с картографированием ландшафтов, не хватает непосредственное применение тепловых инфракрасных данных для оценки ландшафтных процессов и закономерностей в ландшафтной сфере. Несмотря на этот недостаток в исследованиях, потенциал тепловых инфракрасных данных ДЗ для предоставления важной новой информации при анализе и моделировании ландшафтных явлений является высоким [90,105,116].

Применение данных теплового инфракрасного диапазона дистанционного зондирования для ландшафтных исследований было ограничено по трем основным причинам:

- (1) Данные тепловых инфракрасных изображений были мало понятны с точки зрения их применения в ландшафтных картографических исследованиях;
- (2) Отсутствие связей между данными тепловой инфракрасной съёмки и характеристиками исследуемых ландшафтных территории;
- (3) Пространственное разрешение ранее существовавших данных теплового инфракрасного диапазона ДЗ (пространственное разрешение 1 км и выше), полученных в основном с помощью спутников, рассматривается как слишком грубое для ландшафтных исследований и калибровка этих данных

для получения измерений потоков ландшафтной тепловой энергии считается проблематичной.

Тепловые инфракрасные данные ДЗ особенно полезны для понимания и исследования природных ресурсов ландшафтных элементов и для понимания взаимосвязи ландшафтных моделей и процессов [119].

В связи с выше сказанным, цель настоящей диссертационной работы состоит в развитии методов и технологии использования данных тепловых инфракрасных ДЗ для выполнения геоинформационного картографирования ландшафтов, основанного на использовании интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов, описав достоинства использования этих данных при выполнении картографирования ландшафтов и предоставив данные и результаты анализа ландшафтных характеристик с использованием данных тепловых инфракрасных.

1.2. Основные характеристики искусственных спутников Земли и их аппаратуры

Как известно, реальное практическое освоение космоса началось с запуска первого советского искусственного спутника Земли в 1957 году. С тех пор в космос отправлено более 6000 космических аппаратов (КА). 423 из общего числа 957 действующих спутников, которые находятся на орбите в настоящее время, принадлежит США [162]. Вторым владельцем по числу спутников является Россия. Затем следует Китай. Всего разработчики спутниковой аппаратуры представляют 115 государств.

Из российских космических летательных аппаратов [147,148,149,150] следует выделить группировку КА типа «Ресурс-П». Первый из них запущен 25 июня 2013 года, второй – 26 декабря 2014 года, третий – 13 марта 2016 года. Масса целевой аппаратуры кг – 2258 кг.

Параметры орбиты:

- околоразностная, солнечно-синхронная со средней высотой 475 км;
- наклонение 97,276°;
- ширина полосы обзора – 950 км.

Бортовая аппаратура включает ряд комплексов. Первый из них – многозональная высокодетальная аппаратура Геотон с характеристиками:

- 1) полоса захвата (в надире) – 38 км;
- 2) длительность включения от 2 до 300 сек;
- 3) разрешение на местности:
 - не хуже 1 м (панхроматический режим);
 - 2-3 м (мультиспектральный режим);
- 4) спектральные диапазоны съемки (мкм):
 - панхроматический (0,60-0,79);
 - синий (0,48-0,52);
 - зеленый (0,54-0,6);
 - красный + крайний красный (0,62-0,68; 0,66-0,69; 0,7-0,74);
 - ближний ИК (0,72-0,8; 0,8-0,9).

Второй комплекс включает широкозахватную мультиспектральную камеру высокого разрешения с характеристиками:

- 1) полоса захвата (в надире) – 97 км;
- 2) разрешение на местности (проекция пикселя):
 - не хуже 12 м (панхроматический режим);
 - 23,8 м (мультиспектральный режим);
- 3) спектральные диапазоны съемки (мкм):
 - 0,43-0,9 (панхроматический);
 - 0,43-0,51 (синий);
 - 0,51-0,58 (зеленый);
 - 0,6-0,7 (красный);
 - 0,7-0,9 (ближний ИК).

Третий комплекс включает широкозахватную мультиспектральную камеру среднего разрешения с характеристиками:

- 1) полоса захвата (в надире) – 441 км;
- 2) разрешение на местности (проекция пикселя):
 - не хуже 60 м (панхроматический режим);
 - 120 м (мультиспектральный режим);
- 3) спектральные диапазоны съемки (мкм):
 - 0,43-0,7 (панхроматический);
 - 0,43-0,51 (синий);
 - 0,51-0,58 (зеленый);
 - 0,60-0,7 (красный);
 - 0,7-0,9 (ближний ИК).

Четвертый комплекс включает гиперспектральную съемочную аппаратуру с характеристиками:

- 1) полоса захвата (в надире) – 25 км;
- 2) разрешение на местности (проекция пикселя) – не хуже 30 м;
- 3) спектральные диапазоны съемки (мкм) – 0,4-1,1;
- 4) количество спектральных каналов не менее 96;
- 5) спектральное разрешение 5- 10 нм.

Особого внимания заслуживает космический аппарат «Канопус-В», в котором впервые реализован такой инструмент как RPC-полиномы, предназначенный для повышения точности и ускорения процесса обработки данных.

Параметры орбиты:

- круговая солнечно-синхронная, с высотой 675 км;
- наклонение 98,1°.

Спутник снабжен двумя съемочными аппаратами. Первый аппарат – панхроматическая камера (ПСС) со следующими характеристиками:

- спектральный диапазон – 460-850нм;

- полоса захвата – 23 км;
- максимальное разрешение – 2,1 м;
- относительное отверстие – 1:10,3;
- площадь снимка – 43,5 км² (6 кадров);
- фокусное расстояние – 1797 мм.

Второй аппарат – мультиспектральная камера (МСС) со следующими характеристиками:

- спектральные диапазоны:
- синий – 460 - 520 нм;
- зелёный – 520 - 600 нм;
- красный – 630 - 690 нм;
- ближний ИК – 750 - 860 нм;
- полоса захвата – 20 км;
- максимальное разрешение – 10 - 10,5 м;
- относительное отверстие – 1:5,6;
- площадь снимка – 195 км²;
- фокусное расстояние – 359 мм.

К наиболее продолжительному проекту по спутниковому зондированию Земли является программа Landsat (США). Рассмотрим аппаратуру последних двух космических аппаратов Landsat 7 и Landsat 8. Первый эксплуатируется с 1999 года, второй – 2013 года.

Параметры орбиты:

- солнечно-синхронная, с высотой 705 км;
- наклонение 98,2°;
- повторяемость съемки 16 дней.

Landsat 7 снабжен двумя съемочными аппаратами. Один – мультиспектральный сканер (Multi Spectral Scanner (MSS)) со следующими характеристиками:

- полоса захвата – 185 км;

- максимальное разрешение – 80 м;
- спектральные диапазоны, мкм:
 - 1) зеленый – 0.50 – 0.60;
 - 2) красный – 0.60 – 0.70;
 - 3) ближний инфракрасный – 0.70 – 0.80;
 - 4) ближний инфракрасный – 0.80 – 1.10.

Другой съемочный аппарат – улучшенный тематический картограф (Enhanced Thematic Mapper (ETM+)) со следующими характеристиками (таблица 1.1) [150,153]:

Таблица 1.1 – Характеристики материалов, получаемых аппаратом ETM+.

Номер канала	Диапазон спектра (мкм)	Разрешение (м/пиксель)	Название
1	0,45-0,515	30	Голубой
2	0,525-0,605	30	Зеленый
3	0,630-0,690	30	Красный
4	0,775-0,900	30	Ближний инфракрасный
5	1,550-1,750	30	Средний (коротковолновый) инфракрасный
6	10,400-12,500	60	Длинноволновый инфракрасный (тепловой)
7	2,090-2,350	30	Средний (коротковолновый) инфракрасный
8	0,525-0,900	15	Панхроматический (4,3,2)

Результаты съемки, выполняемой по шестому каналу и представляемые пользователям, обрабатываются в двух режимах, с высокой и низкой настройкой. В первом случае они обозначаются как FILE_NAME_BAND_6_VCID_1 и характеризуется более расширенным

динамическим диапазоном параметров излучения, но меньшим радиометрическим разрешением. Во втором случае материалы съемки обозначаются как канал 62, или 6H, или FILE_NAME_BAND_6_VCID_ и характеризуются меньшим диапазоном параметров излучения, но более высоким радиометрическим разрешением.

Спутник Landsat 8 снабжен двумя съемочными комплексами, аппаратом оперативной телевизионной съемки Земли (Operational Land Imager (OLI)) и тепловым инфракрасным датчиком или тепловым инфракрасным сенсором (Thermal InfraRed Sensor (TIRS)) [161,163,164,167].

Таблица 1.2 – Характеристики материалов, получаемых аппаратурой Landsat 8.

Спектральный канал	Спектральные диапазоны (мкм)	Разрешение (м)
Диапазоны OLI		
1 (побережья и аэрозоли)	0,433 - 0,453	30
2 (синий)	0,450 - 0,515	30
3 (зеленый)	0,525 - 0,600	30
4 (красный)	0,630 - 0,680	30
5 (ближний инфракрасный)	0,845 - 0,885	30
6 (коротковолновый инфракрасный)	1,560 - 1,660	30
7 (коротковолновый инфракрасный)	2,100 - 2,300	30
8 (панхроматический)	0,500 - 0,680	15
9 (перистые облака)	1,360 - 1,390	30
Диапазоны TIRS		
10 (дальний инфракрасный)	10,30 - 11,30	100
11 (дальний инфракрасный)	11,50 - 12,50	100

Совмещение каналов 2 – 4 приводит к эффекту цветного изображения, привычному для человеческого зрения. Такие космические фотоматериалы находят широкое применение для топографического дешифрирования и актуализации картографической основы при создании тематических карт. Каналы 4 и 5 используют для получения синтетического изображения построением индекса $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$ – нормализованного относительного индекса растительности (Normalized Difference Vegetation Index). Данный показатель изменяется от -1 до $+1$ и отражает фотосинтетическую активность листового аппарата растительных сообществ, что служит достаточно надежным индикатором роста фитомассы и завершения вегетации. Каналы 10 и 11 отражают излучательную способность земной поверхности, которая свидетельствует о ее радиационной температуре. Низкие значения разностей между полуденной и полуночной температурами элементарных участков земной поверхности свидетельствует о высокой тепловой инерции поверхностных отложений, что указывает на высокое содержание грунтовой и почвенной влаги. Высокие колебания значений дневных и ночных температур является признаком сухости земной поверхности.

1.3. Программные средства обработки материалов спутниковой съемки

В качестве основного геоинформационного программного продукта в данной диссертационной работе использована географическая информационная система ArcGIS, созданная американской компанией ESRI («Environmental Systems Research Institute» или «Институт исследования систем окружающей среды») [70,125].

Средствами ArcGIS созданы картографическая основа и все слои специального содержания в векторных форматах. Построена математическая

модель рельефа провинции Хузестан. Оформление всех результирующих картографических материалов выполнено графическим редактором ArcMap [162]. Целый ряд манипуляций с растровыми данными произведено калькулятором растра в ArcToolbox. Весь статистический анализ выполнен начиная с функции в ArcGIS ArcToolbox → Инструменты Spatial Analyst → Зональные → Зональная статистика в таблицу и заканчивая таблицами в Microsoft Excel.

В ряде случаев при обработке данных спутниковой съемки использован программный продукт ERDAS IMAGINE. Первые версии данной программы создавались компанией ERDASInc. В настоящее время продукт выпускает корпорация Intergraph [154].

Значительный объем спутниковых данных обрабатывался программой ENVI («Environment for Visualizing Images») – предназначенной для визуализации, обработки и анализа геопространственных данных. Инструментарий ENVI представляет собой ряд алгоритмов обработки изображений, полученных в различных диапазонах электромагнитных волн, включая результаты радарного и лазерного сканирования. Данный комплекс позволяет создавать и обучать классификатор изображений на определенном наборе данных и применять его средства автоматизированного дешифрирования материалов аэрокосмической съемки. С помощью ENVI создаются растры, содержащие комбинацию источников данных, их атрибутивную информацию и информацию о пространственной привязке [158,159,160].

К особенностям программы ENVI относятся:

- интуитивно понятный пользователю графический интерфейс;
- интеграция с программными продуктами компании Esri (пользователь может работать, используя функционал ENVI в среде ArcGIS).

1.4. Методы расчета оценочных многокритериальных показателей

В соответствии с целью данной работы главной проблемой оценочного картографирования является разработка показателя, охватывающего определенную совокупность свойств биогенных и минеральных компонентов того или иного участка земной поверхности. Предполагается, что носителем информации о данных свойствах могут служить соответствующие материалы космического зондирования. При этом данные, получаемые при спутниковом мониторинге, следует специальным образом интерпретировать. Другими словами, характеристики радиационной температуры ТЗП земной поверхности и вегетационный индекс NDVI требуется перевести особым образом в баллы, характеризующие биопродуктивность как элементарных единиц ландшафта, так и территорий в пределах административных районов провинции Хузестан, а также земель определенного направления использования, границы которых находятся при автоматизированном дешифрировании данных космической съемки.

Принципы учета оценочных показателей могут быть разные. Один из них предполагает, что наличие определенных свойств объектов картографирования должно соответствовать интервалу значений в пределах некоторого «экологического» оптимума и не выходить за пределы летальных значений. Если таких свойств обнаруживается не одно и количество оценок становится несколько, то величина хотя бы одного из показателей, выходящая за пределы летальных доз приводит к обнулению обобщенного интегрального показателя. С математической точки зрения величина такого индикатора должна вычисляться как среднее геометрическое. Условие – интегральный показатель > 0 – выполнимо только тогда, когда отдельные сомножители будут иметь значения больше нуля, причем при максимуме они должны быть равными 1 (т.

е. интегральный показатель $_{\max} = 1$), иначе интегральный показатель примет значение от 0 до 1. Примером такого показателя является температура земной поверхности ТЗП. Известно, что при отрицательных значениях ТЗП $< 0^\circ$ вегетация растений не происходит. Вегетация на суше угасает также при ТЗП $> 55^\circ$. При расчетах нормированной температуры земной поверхности измеренные спутниковой аппаратурой радиационные температуры нормировались по специальной функции. Температуры до $+5^\circ\text{C}$ и выше $+55^\circ\text{C}$ обнулялись, как экстремальные. Температуры от $+18^\circ\text{C}$ до $+25^\circ\text{C}$ приравнивались к 1, как оптимальные. В диапазоне исходных значений ТЗП от $+5^\circ\text{C}$ до $+18^\circ\text{C}$ нормированная величина увеличивается от 0 до 1 по возрастающему кубическому сплайну, в диапазоне исходных значений ТЗП от $+25^\circ\text{C}$ до $+55^\circ\text{C}$ нормированная величина уменьшается от 1 до 0 по убывающему кубическому сплайну.

Иной принцип учета частных показателей и расчета интегральной характеристики выражается в вычислении средневесового значения. При этом, нулевое значение коэффициента взвешивания означает отсутствие значимости признака, т. е. его исключение. В данном случае состав показателей состояния природно-ландшафтных ресурсов представлен иерархическим деревом признаков с ветвями, соответствующими уровню иерархии. При этом следует учесть, что совокупная сумма весов всех конечных признаков должна равняться 1. Это правило относится и к узловым признакам, характеризующим отдельную ветвь. Примером такого рода оценки состояния природно-ландшафтных ресурсов служит учет балльного температурного фактора, характеризующего отдельный сезон вегетативного развития растений и величина вегетационного индекса NDVI, так же характеризующего отдельный сезон вегетативного развития растений. Т. е. каждый сезон теплого периода года характеризуется значениями ТЗП и NDVI со своими коэффициентами значимости, что означает

учет сезонной динамики факторов, определяющих интегральный индикатор состояния природно-ландшафтных ресурсов (*Iind*), рассчитываемый за ряд лет.

Весовые коэффициенты (коэффициенты значимости) для десяти значений нормированной температуры земной поверхности и для десяти значений NDVI отражены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сезонные весовые коэффициенты при определении *Iind*.

Весовые коэффициенты определения сезонных ТЗП C_{mi}										
C_{m1}	C_{m2}	C_{m3}	C_{m4}	C_{m5}	C_{m6}	C_{m7}	C_{m8}	C_{m9}	C_{m10}	Σ
0,073	0,065	0,058	0,051	0,044	0,036	0,029	0,022	0,015	0,007	0,400
Весовые коэффициенты определения сезонных NDVI C_{nj}										
C_{n1}	C_{n2}	C_{n3}	C_{n4}	C_{n5}	C_{n6}	C_{n7}	C_{n8}	C_{n9}	C_{n10}	Σ
0,011	0,022	0,033	0,044	0,055	0,065	0,076	0,087	0,098	0,109	0,600

Весовые коэффициенты обеспечивают как разную значимость радиационной температуры земной поверхности и вегетационный индекс растительности, так и разную значимость этих частных характеристик от сезона к сезону.

Приведенные методы расчета частных показателей и обобщенной интегральной характеристики потенциала природно-ландшафтных ресурсов организованы в программном комплексе «Признак» [2,22]. Результаты расчетов, выполненных в программе «Признак», экспортированы в атрибутивные таблицы базы данных, соответствующих элементам содержания слоев карт, создаваемых в среде ArcGIS [70,123,159].

1.5. Современное ландшафтное представление провинции Хузестан и её географические особенности

Современное картографирование ландшафтов, выполняемое по материалам спутникового зондирования, все в большей степени имеет необходимые возможности для оценки состояния природно-ландшафтных ресурсов и повышения эффективности эксплуатации существующих ресурсов. Одной из важных возможностей земель является их использование в качестве средств производства сельскохозяйственной продукции. Поэтому в данном исследовании особое внимание обращено на показатели биопродуктивности угодий и температуры земной поверхности. Общеизвестно, что культивирование определенных агрокультур производится в соответствии с наблюдаемыми диапазонами значений оптимума влагонасыщенности и температуры земной поверхности, температуры приземной атмосферы и фотосинтетически активной радиации. Совокупная реакция растительных сообществ на качество среды обитания фиксируется параметрами нормализованного вегетационного индекса NDVI, получаемого по данным дистанционного зондирования из космоса и сопоставляется с урожайностью выращиваемой сельскохозяйственной продукции.

Как уже указывалось, объектом исследования являются элементарные поверхности (как правило, элементарные морфологические единицы ландшафта), единицы административного деления провинции Хузестан, территории определенных видов землепользования. Данная провинция находится на юго-западе Ирана, примыкает к Персидскому заливу, ограничена северными широтами $29^{\circ}58' N$ и $33^{\circ}04' N$ и восточными долготами $47^{\circ}41' E$ и $50^{\circ}39' E$. Основными населенными пунктами (районными центрами) являются Ахваз, Абадан, Эндимешк, Изе, Баге-Мелек, Бендер-Махшехр, Бехбехан, Хорремшехр, Дизфуль, Рамхормоз, Шадеган, Шуштар, Шуш, Гетвенд, Сусенгерд и Месджеде-Солейман. В основном, в провинции Хузестан, распространены засушливые полупустынные ландшафты. Географическое

положение провинции представлено на рисунке 1.1. Площадь Хузестана составляет 64057 квадратных километров, что соответствует 3,89% площади страны. На западе территория имеет государственную сухопутную границу с Ираком и выходит на побережье Персидского залива. Рельеф делит провинцию на две явно выраженные части: горную и равнинную. Равнины занимают немногим более 60% ее площади. В некоторых частях провинции наблюдаются соляные купола, представленные кембрийскими отложениями. Горная гряда Загрос в направлении юго-запада переходит в равнину, которая простирается до побережья Персидского залива, охватывая районы Дизфуль, Рамхормоз, Бехбехан и Месджеде-Солейман.

Вместе с тем в пределах определенной территории, погодные условия от года к году разнятся, причем не редко кардинально. Из чего следует, что одной из важных задач ГИС сопровождения мониторинга природопользования является накопление базы геоданных за достаточно представительный ряд лет и представление интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов (*Iind*) серией оценочных карт, отражающих различные принципы деления оцениваемой территории. Таким образом, очевидна необходимость разработки принципов и методики построения на основе данных космического зондирования Земли из космоса, базы геоданных, включающей формализованное и не формализованное деление территории картографирования, описание выделенных операционных единиц параметрами сезонной изменчивости, температуры земной поверхности, и сезонной изменчивости нормализованного индекса растительности с постоянным наращиванием годовых массивов информации.

1.5.1. Климат.

Провинция Хузестана подвержена воздействию со стороны Аравийских пустынь и Персидского залива. Для Хузестана характерны высокие суточные и сезонные колебания температуры. Весна ранняя, уже в апреле приземная атмосфера прогревается до 20°C [77]. В северных и восточных горных районах осадков выпадает значительно больше, чем в равнинных западных и южных районах. Таким образом, на территории горных районов климат является преимущественно умеренно теплым, тогда как в равнинных районах климат резко континентальный жаркий. В атмосферном переносе преобладают ветры западные и северо-западные. Воздушный массообмен делятся на две категории: 1) региональный сезонный, обусловленный разностями давления, как правило, с более влажными потоками воздушных масс; 2) местный резко переменный, который создается разностью температур и плотности, например, холодный воздушный поток, дующий со стороны гор в сторону равнин или, например, теплый и влажный воздушный поток перемещающийся с Персидского залива и распространяющийся по равнинным районам. Особым микроклиматом обладают районы, примыкающие к Персидскому заливу. На этих территориях зима влажная и теплая, лето умеренно жаркое, хотя в течение летнего периода временами погода принимает удушливый характер [67,95].

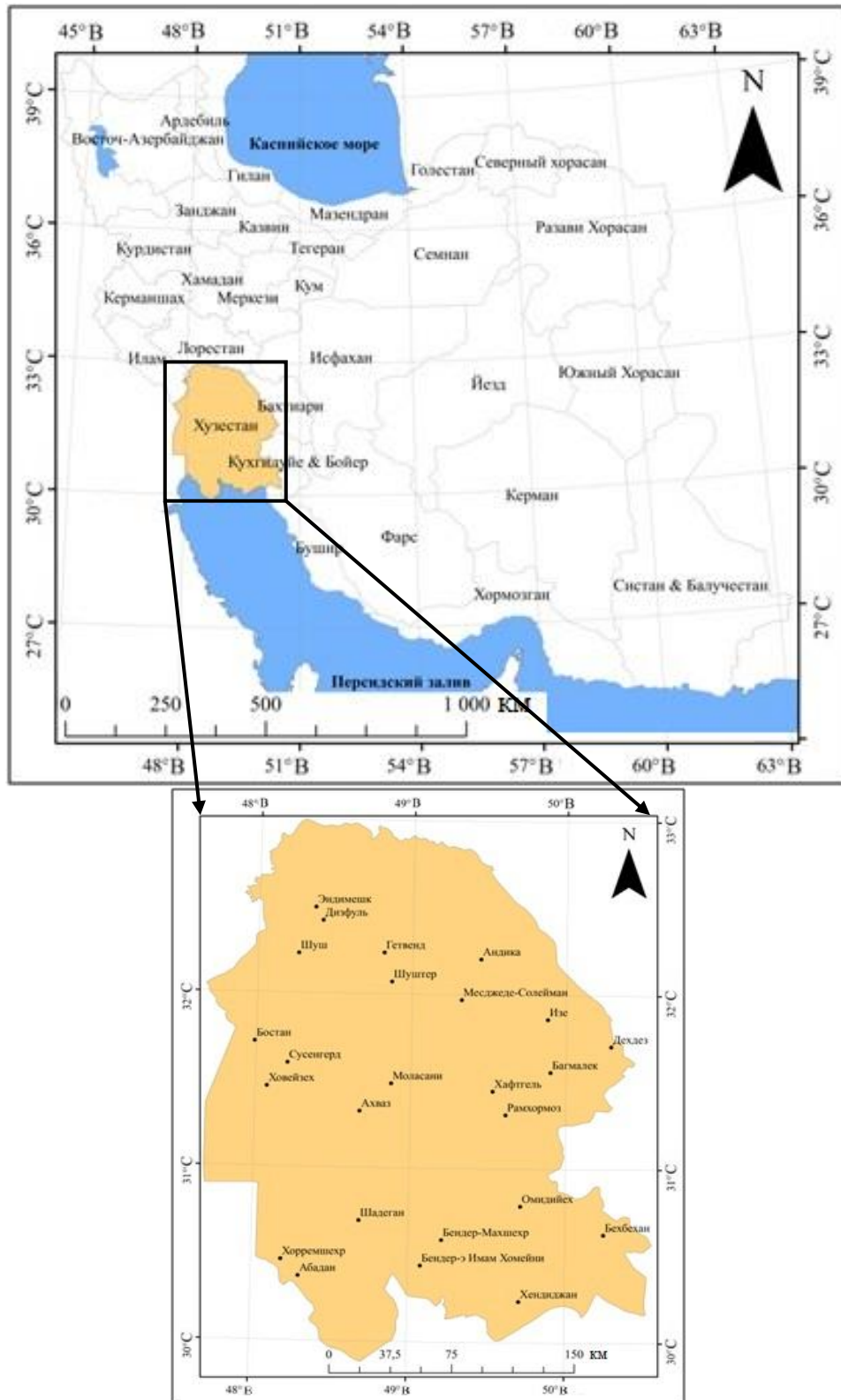


Рисунок 1.1 – Провинция Хузестан Ирана.

Температурные различия между западом и востоком провинции достигают 7°C , а между севером и югом – 3°C . Годовое количество осадков

провинции нарастает с Юго-Запада на Северо-Восток, меняясь от 150 мм до 1000 мм. Одним из замечательных климатических факторов провинции является большое количество часов отсутствия облачности. В большинстве районов Хузестана среднегодовая продолжительность ясного неба достигает 3000 часов и более, что способствует развитию солнечной энергетики, альтернативной энергетике, используемой добываемые нефть и газ.

В предгорьях климат переходный и достаточно благоприятный для произрастания растений, характерных для субтропической зоны, чему так же способствует накопление стекающей с гор грунтовой влаги. Зима в этих районах короткая и практически всегда безморозная. Лето здесь долгое и достаточно жаркое.

Испаряемость на территории Хузестана, меняясь от года к году, находится в пределах от 2000 до 4000 мм. Средняя годовая температура в горных районах равна $+14^{\circ}\text{C}$, в равнинных районах составляет $+25^{\circ}\text{C}$.

1.5.2. Растительность.

Естественная растительность провинции Хузестан в основном засухоустойчивая (аридная), а её видовой состав определяется как микроклиматическими особенностями отдельных территорий, так и литологией поверхностных отложений. К типичным представителям полупустынных растений относятся: Астраканта (*Astracantha*), Мимозка выполненная (*Lagonychium farctum*), Шпажник (*Gladiolus*), Синеголовник голубой (*Eryngium caeruleum*) и др. Отдельными куртинами произрастает фисташка (*Pistacia Khinjuk*), черный миндаль (Black almond), тамарикс (Tamarisk) и инжир (Figs).

Горная гряда Загрос, занимающая Северо-Восток провинции, сложена, главным образом, известняком и богата месторождениями каменных солей различной природы. Этими обстоятельствами обусловлено высокое содержание в речном, склоновом и грунтовым стоке солей, которые концентрируются в

некоторых аккумулятивных областях предгорных равнин. Но в основном территории, прилегающие к горам Загрос, являются местоположением растительных сообществ, пригодных для пастбищного животноводства, или являются угодьями, подверженными соответствующей мелиорации, с приобретением качества основных средств производства, сектора фермерского растениеводства.

На незасоленных участках развиваются варианты фриганоидных кустарниковых сообществ с доминированием *Artemisia herba-alba* и *Astragalus gelaucanthus*. Эти два кустарника сочетаются с другими видами низких кустарников и кустарничков, часто колючих. В экстремально-аридных условиях образуются куртинные кустарниковые пустыни с доминированием полыни *Artemisia herba-alba*, астрагала *Astragalus gossypius* и др. растений. В районах с количеством осадков более 100 мм характерны представители родов *Pteropogon*, парнолистник (*Zygophyllum*) и миндаль (*Amygdalus*). Здесь также встречаются многочисленные однолетники и невысокие кустарники – такие как солянка деревцевидная *Salsola arbuscula*, терескен Эверсмманна *Krascheninnikovia ewersmanniana*, *Scariola orientalis*, *Gaillonia brugieri*, *Dendrostellela lessertii* и *Pulicaria crispa*, а также многолетние травянистые – *Eremostachys regeliana*, ковыль бородатый *Stipa barbata*, осока вздутая *Carex physodes* и геофиты – ирис сунгарский *Iris songarica*, луки волокнистый и каспийский (*Allium fibrosum*, *Allium caspium*) [145].

Склоновые поверхности у подножий часто служат зимними пастбищами. Степная растительность представлена астрагалово-полынными сообществами и полыньниками.

В районах, прилегающих к Персидскому заливу, размещаются плантации по выращиванию фиников пальчатых (*Phoenix dactylifera*), цитрусов китайских (*Citrus sinensis*) маслин европейских (*Olea europaea*). На этих землях встречаются низкорослые дубовые леса, в которых доминантами служат дуб валлонова и дуб красящий, отдельными особями представлен дуб персидский (*Quercus Persica*).

Здесь распространены рисовые поля, и пашни, на которых культивируется пшеница и ячмень.

1.5.3. Водоемы суши.

Хузестан является провинцией – одной из лидеров по насыщенности водоемов. При площади, составляющей 3,6% от общей площади страны, в Хузестане сосредоточено более 30% всей водной поверхности. На эту территорию поступает более 33 млрд. кубических метров поверхностных вод. Кроме того, порядка 3 млрд. кубических метров воды находится в подземных водоносных горизонтах.

Наличие поверхностных вод обеспечивает распространённость различных форм земледелия. Если для горных районов источником поступления влаги являются естественно атмосферные осадки, то для равнинных ландшафтов, с характерными для них жарким микроклиматом и соответственно высокой испаряемостью, основными источниками водообеспечения служат озера, реки и резервуары подземных вод. Территорию Хузестана пересекают пять больших рек: Карун, Кархе, Дез (приток р. Карун), Марун, Хендиджан. Их истоки находятся в горах Загрос и впадают все они в Персидский залив. Карун является самой протяженной и единственной судоходной рекой в Иране. Средний расход воды – 575 м³/с, длина – 950 км, площадь водосборного бассейна – 65 230 км² [158].

Кархе является третьей по протяженности рекой Ирана, на юго-западе провинции и питает водно-тростниковые топи (марш) Хурол-азим, протекая по границе с Ираком. Река Дез впадает в р. Карун южнее города Дизфуль. Её водами обеспечиваются все сельскохозяйственные угодья на прилегающей территории. Река Марун берет свое начало на северо-западе в районе города Ясуджа. Служит источником водоснабжения земель Рамхормоза и Рамшира.

Источник реки Хендиджан или Зохре находится в районе Кохгилуйе и южнее города Хендиджан впадает в Персидский залив.

Озера и искусственные водохранилища являются достаточно распространенными водоемами Хузестана. Образованное плотиной озеро Дээ, которое является одним из самых больших в провинции, находится северо-восточнее города Эндимешк. Тэмми, являясь одним из самых живописных озер, расположено в горных районах страны, в самой северной точке провинции. Данное озеро питается водами снежников окружающих гор. Озеро, образованное плотиной на реке Кархе находится западнее города Эндимешк. Возведенное гидротехническое сооружение служит и гидроэлектростанцией, и стабилизатором водного поверхностного стока, обеспечивая водой сельскохозяйственные земли, не допуская их затопления. Первое водохранилище, образованное плотиной на реке Карун (в районе Шахид Аббаспур) находится северо-восточнее города Месджеде-Солейман. Второе водохранилище, образованное плотиной на этой же реке Карун расположено северо-восточнее города Месджеде-Солейман. Третье водохранилище находится в пределах русла реки Карун на востоке провинции. Озеро Гетвенд создано плотиной северо-восточнее города Гетвенд. Водоохранилище на реке Марун расположено севернее города Бехбехане. Водоохранилище Джарэ находится севернее города Рамхормоз на востоке провинции.

Особыми гидрологическими объектами, распространенными на картографируемой территории, являются марши – болота определенного типа, образующиеся часто на морских побережьях в устьях рек. Данные болотные образования представлены тростниковыми зарослями. Марши распространены в южных и западных частях провинции Хузестан. Хурол-азим (Хурол-Ховейзе), питающийся реками Кархе и Эрвендруд, является самым большим болотом территории, расположенном на западе провинции, оно покрыто тростником обыкновенным (*Phragmites australis*) высотой до 4 м, многолетним злаком, одним из самых широко распространённых видов цветковых растений. Другой

марш Шадеган площадью 296 тысяч гектаров расположен между городами Абадан и Шадеган. Поверхность марша покрыта гидрофильными растениями, такими как широколистный рогоз и осока. Похожий по видовому составу растений марш Бамдеж находится северо-западнее города Ахваз.

Отдельные заболоченные территории (марши) подвергаются осушительной мелиорации. Производится забор подземных вод и строительство сети осушительных каналов. На инженерно-обустроенных землях выращиваются агрокультуры, организовываются пастбищные угодья, сооружаются объекты туристической отрасли и рекреации. Примером территории такого хозяйственного освоения является марш Мянгаран, расположенный в окрестностях города Изе на Северо-Востоке провинции. Режим водного питания данного болотного образования обусловлен грунтовым стоком, образующимся при таянии снежников окружающих гор. Естественным растением для данного марша является тростник обыкновенный, который при рекультивации замещается на пастбищные культуры: посевную люцерну и сенной пажитник.

1.5.4. Характеристика сельскохозяйственных земель.

Хузестан с точки зрения возможностей производства сельскохозяйственных продуктов является одной из наиболее важных провинций страны. Плодородие почв равнин Хузестана одно из наиболее высоких. Климатические особенности территории позволяют собирать урожай два раза в год. Основные площади сельскохозяйственных земель расположены на юге, юго-западе. Они простираются севернее города Ахваз, южнее городов Гетвенд, Шуштер, Дизфуль. Особенно обширные пахотные угодья размещены в окрестностях города Дизфуль. Типичные выращиваемые продукты питания включают: финики, апельсины, яблоки, арбузы, дыни, огурцы, картофель, лук, помидоры, оливки, сахарный тростник, рис, пшеницу, ячмень. Кроме того

культивируются многочисленные лекарственные виды растений, производится, например, эфирное масло, содержащееся в листьях эвкалиптовых деревьев [146].

Наиболее обильным травостоем с богатым составом кормовых видов характеризуются пастбища, расположенные на подножиях горного массива Загрос. С удалением от горной гряды степные ландшафты переходят в пустынные территориально-природные комплексы, не пригодные к земледелию.

1.6. Выводы по первой главе

В первой главе освещен опыт картографирования ландшафтов территории по данным спутникового термического зондирования. Описаны основные характеристики искусственных спутников Земли и их аппаратуры. Приведена характеристика съемочной аппаратуры Landsat 7 и 8. Представлены характеристики программных средств обработки материалов спутниковой съемки. Описаны методы расчета оценочных многокритериальных показателей. Приведено современное ландшафтное представление провинции Хузестан и её географические особенности.

Сформулированных автором цель и задачи диссертационного исследования основываются на следующих ключевых положениях:

1. Тепловые космические снимки спутников Landsat 7 и 8 являются наиболее подходящими данными ДЗ для картографирования природно-ландшафтных ресурсов.

2. Оценочное картографирование природно-ландшафтных ресурсов с использованием материалов спутниковой съемки решает задачу, как актуализации картографической основы, так и получения статистически представительного массива данных.

3. Современное картографирование ландшафтов, выполняемое по материалам спутникового зондирования, решает задачу использования земель в качестве средств производства сельскохозяйственной продукции в провинции Хузестан Ирана.

4. Методика автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования, решает задачу геоинформационного картографирования ландшафтов.

5. Показатели сезонной динамики радиационной температуры земной поверхности, нормализованного вегетационного индекса растительных сообществ, рассчитываемые с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса, используются для оценки состояния природно-ландшафтных ресурсов территории.

6. Оценочное картографирование предполагает многокритериальный анализ и расчет интегрального показателя, отражающего динамику ТЗП °С и NDVI в течение теплого периода времени. Каждый интервал времени, отмечаемый радиационной температурой и вегетационным индексом, имеет свой коэффициент значимости.

7. Методика формализованного деления исследуемой территории на типы элементарных поверхностей (в соответствии с требованиями к сельхозугодьям), параметризуемые сезонной изменчивостью значений вегетационного индекса NDVI и радиационной температуры земной поверхности, используется для оценка состояния природно-ландшафтных ресурсов территории и использования земель.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ

2.1. Обобщенная структурная схема использования снимков Landsat для картографирования ландшафтов

Калибровка материалов спутниковой съемки обычно выполняется с помощью данных, полученных наземной аппаратурой на специальных полигонах, с использованием специальных алгоритмов предварительной обработки материалов космических съемок. Порядок и правила выполнения таких алгоритмов зависят от съемочной аппаратуры [57].

Полученную информацию при тепловом дистанционном зондировании Земли можно использовать для исследования пространственно-временной динамики ландшафтного покрова и когда температура земной поверхности ТЗП является индикатором явлений и объектов, скрытых от непосредственного наблюдения [16]. Методика дешифрирования разносезонных тепловых космических снимков можно применять для целей ландшафтного картографирования на основе временной динамики [3]. Картографирование является эффективным методом изучения пространственного потенциала и оценки динамики растительного покрова [17]. Новые методы составления карт с использованием автоматизированного дешифрирования космоснимков изменили общепринятую технологию картографирования [35].

Исходными данными для проведения экспериментальных исследований послужили материалы метеостанций провинции Хузестан Ирана (за период 2011 – 2015 гг.); материалы космической съемки со многоспектрального сканирующего радиометра ETM+ спутника Landsat 7 (2011 – 2012гг.);

материалы космической съемки съемочной аппаратуры спутника Landsat 8 (2013 – 2016гг.) и материалы полевых изысканий за период 2016г. (июль и август).

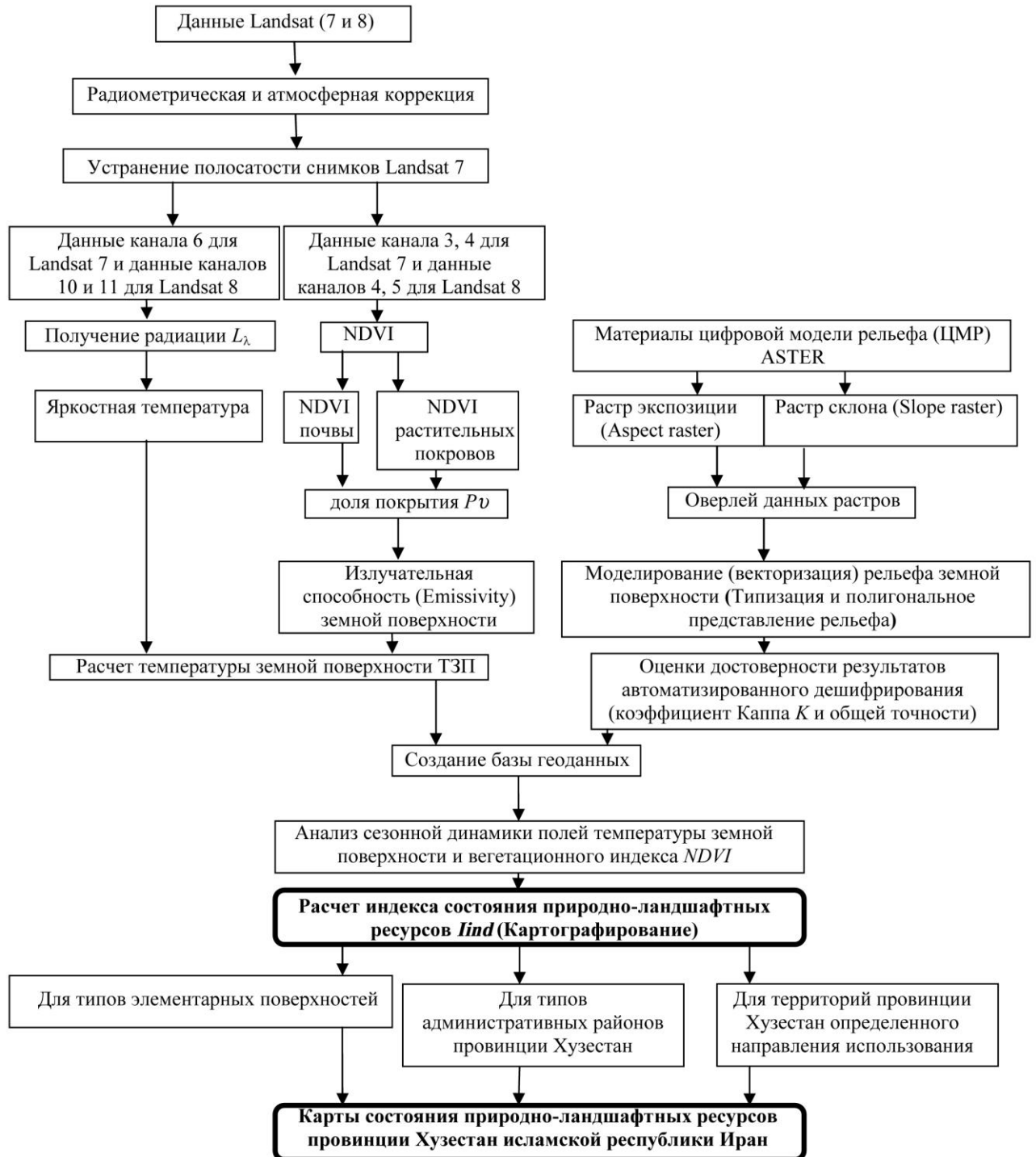


Рисунок 2.1 – Схема предлагаемой методики исследования.

При решении задач диссертационного исследования выполнена и представлена методика автоматизированного дешифрирования разновременных космических данных для геоинформационного картографирования состояния природно-ландшафтных ресурсов *Iind* провинции Хузестан Ирана по показателям сезонной изменчивости температуры земной поверхности ТЗП и вегетационного индекса NDVI. Функциональная схема методики дешифрирования снимков спутников Landsat 7 и 8 с целью картографирования ландшафтов территории представлена на рисунке 2.1.

2.2. Радиометрическая коррекция спутниковых данных.

Изображения, получаемые спутниковой аппаратурой, представляют собой растры, у которых яркостные характеристики пикселей должны строго соответствовать отражательным (или излучательным) способностям элементарных участков зондируемой территории в определенном диапазоне длин (частот) электромагнитных волн. Далее данные значения пересчитываются в определенные физические величины, значения которых указывают на свойства земной поверхности и поверхностных отложений. Но прежде чем использовать тот или иной алгоритм математического преобразования растра его следует освободить от искажений. Искажения могут быть вызваны сбоями аппаратуры (например, пропуски линий сканирования или разрывы между снимками), обусловлены систематическими ошибками в работе электронно-оптических приборов, вызваны поглощением и рассеиванием электромагнитного сигнала атмосферой, облаками и т.д. Наконец искажения могут быть вызваны отклонением при съемке от надира, особенностями центральной проекции, а так же перепадами высотных отметок земной поверхности [124].

Спутниковая аппаратура настраивается (калибруется) сопоставлением космических снимков с наземными инструментальными наблюдениями на специальных полигонах. Калибровочные параметры являются поправочными коэффициентами в математических алгоритмах коррекций исходных материалов, получаемых с космических аппаратов. Результаты коррекции служат первичными картографическими данными. Формулы и порядок вычислений зависят от съемочной аппаратуры и реализуются разными программными средствами. В данной диссертационной работе использована последовательность коррекций материалов зондирования земной поверхности спутником Landsat 7 за период 2011 и 2012 годов и спутником Landsat 8 за период 2013, 2014, 2015 и 2016 годов.

Сначала в программе ENVI [68] выполнена радиометрическая коррекция сигналов по каналам красного *RED* и ближнего инфракрасного *NIR* диапазонов электромагнитных волн (пункт меню «Radiometric Calibration»), затем, – теплового диапазона (пункт меню «Radiometric Calibration») [157].

2.3. Атмосферная коррекция спутниковых данных.

Поглощение и рассеивание электромагнитных волны в атмосфере для разных диапазонов спектра происходит не одинаково. Прозрачность атмосферы влияет на контрастность изображения снимков и приводит к искажению цветов. Большое окно прозрачности (0,4-1,3 мкм) приходится на видимый и ближний инфракрасный диапазон; в тепловом инфракрасном диапазоне три более узких окна, и здесь возможно использование ограниченного набора длин волн. Наибольшая прозрачность наблюдается при радиодиапазоне (от сотен КГц до десятком МГц).

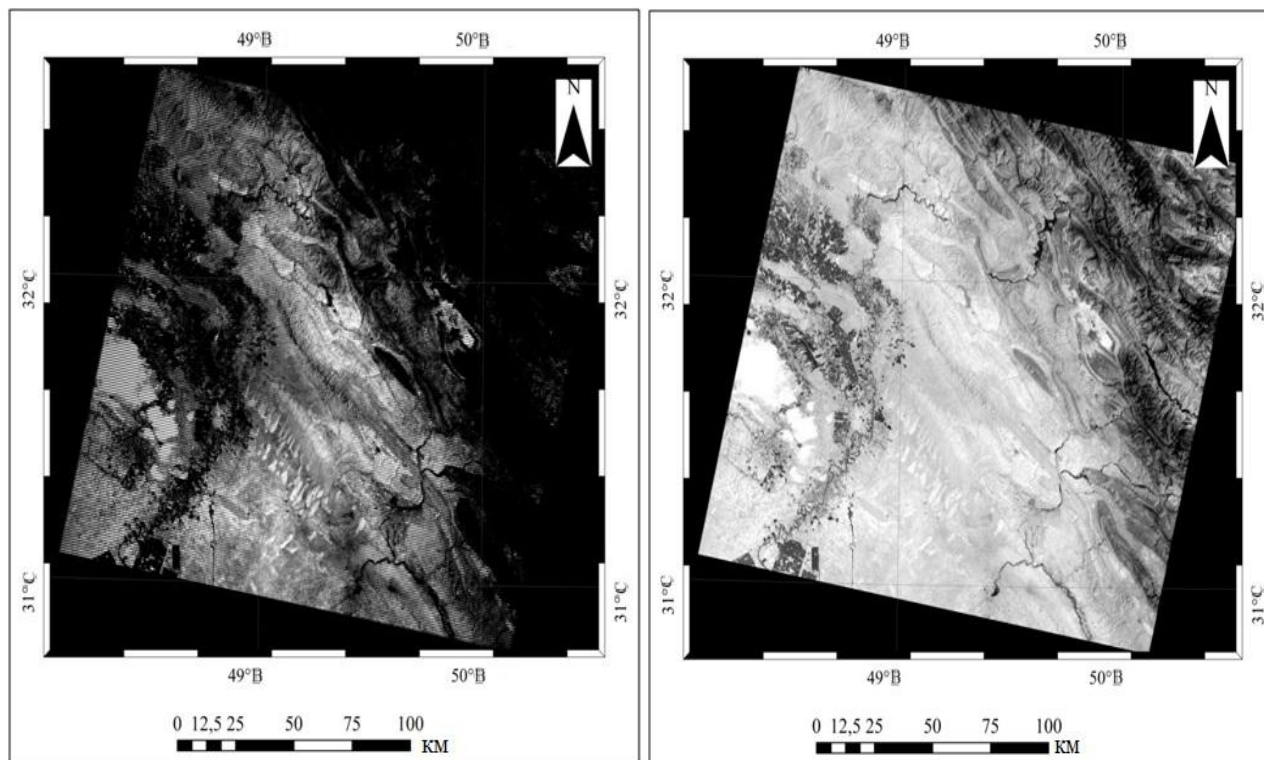
Влияние атмосферы на качество изображения увеличивается от центра к краям снимка. Чем больше угол обзора съемочной аппаратуры, тем

значительнее разность в пропуске солнечных лучей. При съемке земной поверхности коррекции подлежат как яркостные параметры пикселей раstra, отличные для каждого канала построения изображения, так и геометрические свойства простейших элементов изображения.

В среде программы «ENVI» выполнена атмосферная коррекция сигналов *RED* и *NIR* каналов по пункту меню «FLAASH Atmospheric Correction» [156], а так же сигналов тепловых каналов по пункту меню «Thermal Atmospheric Correction» [155].

2.4. Особенности предварительной обработки данных, получаемых со спутника Landsat 7.

Характерной особенностью многоспектрального оптико-механического сканирующего радиометра ETM+ спутника Landsat 7 являются пропуски линий сканирования. 31 мая 2003 года прибор Scan Line Corrector (SLC) вышел из строя. Без данного прибора изображения приобрело вид чередующихся полос. 3 сентября 2003 года аппаратура ETM+ и другие системы космического аппарата были перенастроены. После перенастройки оборудования Landsat 7 пропуски в растровых изображениях остались, сужаясь от края к центру. В связи с этими свойствами материалов зондирования, поступающих от Landsat 7, в программных продуктах, предназначенных для работы с материалами спутниковой съемки, появились инструменты ликвидации такого рода недостатков заполнением пропусков в изображении методом интерполяции значений соседних пикселей. Например, в программе ERDAS с помощью пункта меню «Focal Analysis» реализуется функция заполнения пропусков (пробелов) в растровых изображениях Landsat 7 [160,166] (рисунок 2.2).



(a)

(б)

Рисунок 2.2 – Растровые представления снимков, полученных аппаратурой КА Landsat 7 до устранения полосатости (а); Растровые представления снимков, полученных аппаратурой КА Landsat 7 после устранения полосатости (б).

2.5. Построение мозаики снимков картографируемой территории средствами ERDAS.

Процесс создания мозаики заключается в объединении отдельных снимков (кадров) в одно изображение, представленное без разрывов, в определенной системе координат и картографической проекции [37,158]. Пункт меню «Mosaic Pro», предусматривает возможность согласования соотношения яркостных характеристик отдельных снимков коррекции гистограмм изображений, что, в свою очередь, позволяет достичь общей цветовой гаммы представления элементов мозаичного изображения. Кроме того, созданию

мозаики предшествует приведение всех изображений к общей системе координат, проекции и разрешающей способности растров [154].

Мозаичное изображение провинция Хузестан построено по снимкам Landsat 7 и 8 с номерами рядов/колонок 164/38, 164/39, 165/37, 165/38, 165/39, 166/37, 166/38 и 166/39.

2.6. Расчет вегетационного индекса NDVI и температуры земной поверхности.

2.6.1. Построение растровых изображений нормализованного относительного индекса растительности NDVI.

Построение полей NDVI производится в программе ArcGIS используя калькулятор растров по формуле [138,142]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (2.1.)$$

где *NIR* – отражательная способность земной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне солнечных лучей, *RED* – отражательная способность земной поверхности в красном диапазоне солнечных лучей. Данный показатель отражает фотосинтетическую активность листового аппарата растительных сообществ, служит индикатором накопления фитомассы растений и завершения вегетации. На рисунках 2.3 и 2.4 отражены фрагменты построенных мозаик для пустынных и лесостепных районов провинции Хузестан.

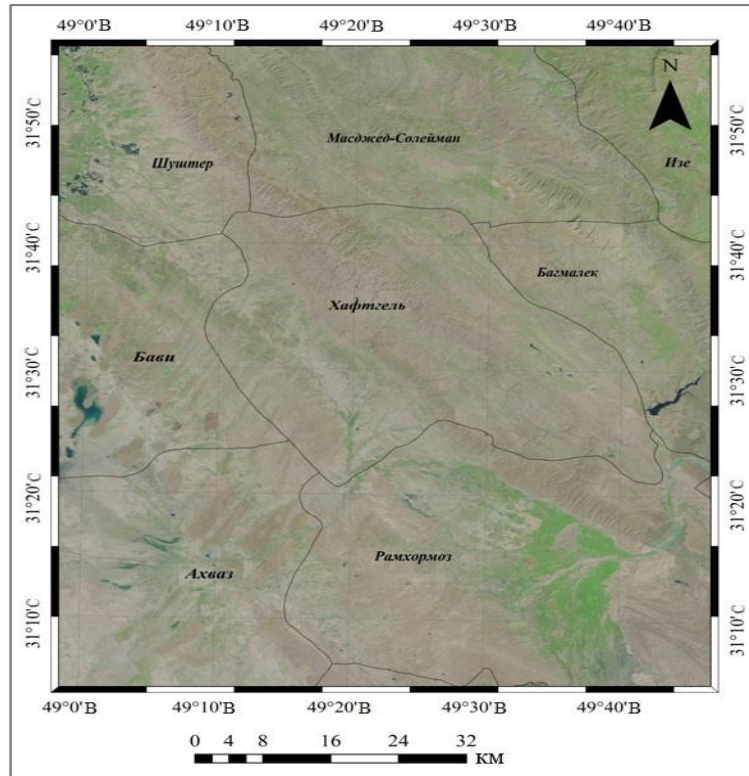


Рисунок 2.3 – Фрагмент построенных мозаик для пустынных районов провинции Хузестан.

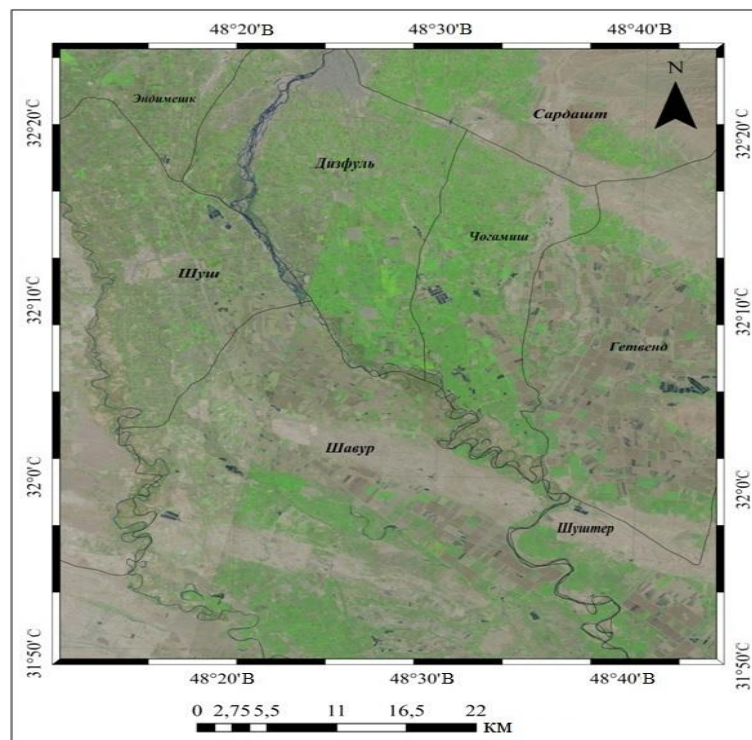


Рисунок 2.4 – Фрагмент построенных мозаик для лесостепных районов провинции Хузестан.

2.6.2. Переход от излучения земной поверхности к радиационной температуре.

Расчет температуры земной поверхности (ТЗП) [83,85,97,99,103,136] по данным, полученным аппаратурой спутника Landsat 7 в 2011 и 2012 годах, был выполнен с использованием алгоритма перехода от излучения земной поверхности к радиационной температуре (Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm).

Реализация математического алгоритма выполнена в калькуляторе раstra ArcGIS [74]. Излучательная способность земной поверхности ε складывается (см. формулу 2.2) из излучательной способности растительности $\varepsilon\nu$, равной 0,99, доля покрытия которой составляет $P\nu$, из излучательной способности открытой почвы εs , равной 0,97, соответственно занимающей долю, равную $1 - P\nu$, и из «внутреннего отражения» от склоновых поверхностей $d\varepsilon$ ($d\varepsilon$, пренебрежимо мало для нашей территории, потому что большинство площади территории состоит из равнинных), пренебрежимо мало для равнинных территорий и пропорционально возрастающего с увеличением угла падения склоновых поверхностей [132,138]:

$$\varepsilon = \varepsilon\nu \times P\nu + \varepsilon s \times (1 - P\nu) + d\varepsilon. \quad (2.2.)$$

Изображение показателя $P\nu$ построено калькулятором растров в ArcGIS по формуле:

$$P\nu = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2, \quad (2.3.)$$

где $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ – максимальное и минимальное значение вегетационного индекса соответственно.

Следующий этап радиометрической коррекции заключается в получении изображения L_λ по формуле, реализуемой калькулятором растров:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}} \right) \times (QCAL - QCAL_{MIN}) + L_{MIN}, \quad (2.4.)$$

где: L_λ – растровое представление мощности теплового потока, передаваемого электромагнитной волной длиной λ , излучаемой с единицы площади в пределах сканируемого телесного угла размерностью Вт/(м²×стер×мкм), $QCAL$ – растр, фиксируемый бортовой съемочной аппаратурой, $QCAL_{MAX} = 255$, $QCAL_{MIN} = 1$.

Для периода 2011 и 2012 годов использованы данные, фиксируемые многоспектральным оптико-механическим сканирующим радиометром ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) спутника Landsat 7, приведенные в таблице 2.1 [92].

Таблица 2.1 – Характеристики спектральных диапазонов съемочной аппаратуры спутника Landsat 7 (L – Мощность теплового потока, передаваемого потоком электромагнитных волн длиной λ , излучаемых с единицы площади в пределах сканируемого телесного угла).

Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Центральная волна, мкм	L_{min} (Вт/(м ² ×стер×мкм))	L_{max} (Вт/(м ² ×стер×мкм))
Каналы 6-1 низкого коэффициента усиления (Low gain)				
3 RED	0,631-0,692	0,662	-5	234,4
4 NIR	0,772-0,898	0,835	-5,1	241,1
6	10,31-12,36	11,335	0	17,04
Каналы 6-2 высокого коэффициента усиления (High gain)				
3 RED	0,631-0,692	0,662	-0,5	152,9
4 NIR	0,772-0,898	0,835	-5,1	157,4
6	10,31-12,36	11,335	3,2	12,65

Переход от скорректированного сигнала к эффективной яркостной температуре производится с использованием следующего уравнения [97]:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (2.5.)$$

где: T_B – изображение, отражающее яркостную температуру по шкале Кельвина, K_1 и K_2 – константы калибровки, приведенные в метаданных ($K_1 = 666,09$ Вт/(м²×стер×мкм), $K_2 = 1282,71$ °К).

На следующем этапе представление яркостной температуры T_B преобразовывается в растр температуры поверхности земли $T_{ЗП}$ следующим образом [110]:

$$T_{ЗП} = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \times \frac{T_B}{\rho}\right) \cdot \ln \varepsilon} \quad (2.6.)$$

где, λ – длина волны излучаемой радиации (11,5мкм), $\rho = h \times (c/\sigma) = 1,438 \times 10^{-2}$ мК, h – постоянная Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж×с), c – скорость света ($2,998 \cdot 10^8$ м/с), σ – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К).

Получаемые изображения температуры земной поверхности в градусах Кельвина $T_{ЗП}$ °К преобразовывались в изображения температуры земной поверхности в градусах Цельсия $T_{ЗП}$ °С по формуле: $T_{ЗП}$ °С = $T_{ЗП}$ °К - 273,15 [106].

2.6.3. Алгоритмы восстановления или коррекции данных Landsat 8.

Расчет температуры земной поверхности (ТЗП) для данных Landsat 8 (2013, 2014, 2015 и 2016 года) был выполнен с использованием алгоритма «расщепленного окна прозрачности» (Split Window (SW) algorithms) [81,100,102,131,137]. Обработка растров выполнялась в ArcGIS, используя пункт меню «Raster Calculator» [113].

Изображения вегетационного индекса NDVI получены в соответствии с формулой (2.1.).

Растровые представления доли покрытия земной поверхности растительностью Pv получены по формуле:

$$Pv = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s), \quad (2.7.)$$

где: для открытой почвы $NDVI_s = 0,2$, для земной поверхности, покрытой растительностью полностью $NDVI_v = 0,8$.

Изображения общей излучательной способности земной поверхности ε [117,122] строились по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_s \times (1 - Pv) + \varepsilon_v \times Pv, \quad (2.8.)$$

где: ε_v и ε_s – излучательная способность растительности и почвы, соответственно, $\varepsilon_v = 0,987$ для канала 10 и $0,989$ для канала 11, $\varepsilon_s = 0,971$ для канала 10 и $0,977$ для канала 11.

Для представления спектральной яркости L_λ по исходным растрам $QCAL$ (полученным по 10 или 11 каналам) использовалась формула:

$$L_\lambda = M_L \times QCAL + A_L, \quad (2.9.)$$

где: $M_L = 0,000342$ для 10 и 11 каналов, $A_L = 0,1$ для 10 и 11 каналов.

Растры яркостной температуры T_B создавались согласно формуле [114]:

$$T_B = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L_2} + 1\right)}, \quad (2.10.)$$

где: $K_1 = 774,89$ для канала 10 и $K_1 = 480,89$ для канала 11, $K_2 = 1321,08$ для канала 10 и $K_2 = 1201,14$ для канала 11.

На основании произведенных преобразований были получены изображения температуры земной поверхности $TЗП$ в градусах Кельвина [100]:

$$TЗП = TB_{10} + C_1 (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W) \times (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W) \Delta\varepsilon, \quad (2.11.)$$

где: W – содержание водяного пара в атмосфере $0,053 \text{ г} \times \text{см}^{-2}$, $\varepsilon = (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})/2$, ε_{10} и ε_{11} – растры излучательной способности земной поверхности, полученные по каналам 10 и 11, TB_{10} и TB_{11} – изображения яркостных температур в градусах Кельвина, полученные по каналам 10 и 11, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$. Коэффициенты уравнения (2.11.), приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициенты алгоритма «расщепленного окна прозрачности» (SW), заданной формулой (уравнение 2.11.).

Коэффициент	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Значение	-0,268	1,378	0,183	54,300	-2,238	-129,200	16,400

Получаемые изображения температуры земной поверхности в градусах Кельвина $TЗП \text{ } ^\circ\text{K}$ преобразовывались в изображения температуры земной

поверхности в градусах Цельсия $T_{3П} \text{ } ^\circ\text{C}$ по формуле: $T_{3П} \text{ } ^\circ\text{C} = T_{3П} \text{ } ^\circ\text{K} - 273,15$ [110].

Алгоритм «расщепленного окна прозрачности» (SW) разработан для компенсации влияния зенитного угла при оценке прозрачности атмосферы. В процессе зондирования земной поверхности космическим аппаратом Landsat 8, при высоте его орбиты 705 км и ширине полосы охвата съемкой 185 км, максимальное значение зенитного угла составляет около $7,5^\circ$. Влияние этого угла на прозрачность атмосферы в каналах 10 и 11 Landsat 8 незначительно [112].

Поглощение атмосферой электромагнитных волн в диапазоне 10,5-12,5 мкм, в основном, зависит от содержания водяного пара, распространенность которого имеет высокую пространственную изменчивость. Углекислый газ CO_2 и метан CH_4 обладают ярко выраженным парниковым эффектом, т. е. экранируют тепловое излучение, но изменчивость их концентрации в атмосфере достаточно плавная и резких границ не образует [76,80].

Алгоритм «расщепленного окна прозрачности» (SW) предусматривает учет влияния водяного пара на прозрачность атмосферы для тепловых волн [103].

Характеристики прозрачности оцениваются по статистическим расчетам, выполняемым в процессе анализа специализированной базы данных, представляющей собой набор характеристик, наблюдаемых на определенном атмосферном профиле. По такому профилю строится математическая модель «MODTRAN инфракрасный свет в атмосфере», отражающая влияние влажности воздуха на пропускание тепловых волн [73,76]. Влажность W , может измеряться при космической съемке в процессе полевых работ или быть получена от ближайшей к территории зондирования метеорологической станции.

В модели «MODTRAN инфракрасный свет в атмосфере» учитывается содержание углекислого газа CO_2 , метана CH_4 , тропосферного озона. Для диоксида углерода CO_2 эта величина составляет 400 ppm (parts per million – частей на миллион) или 0,04% [152], для метана CH_4 концентрация равна 1,7 ppm или 0,00017% [165], концентрация стратосферного озона равна 28 ppb (parts per billion – частей на миллиард) или 0,0000028%.

Моделирование MODTRAN, проведенное для летнего атмосферного профиля средних широт, использовано для представления изменения содержания атмосферного водяного пара (W) с высотой (рисунок 2.5).

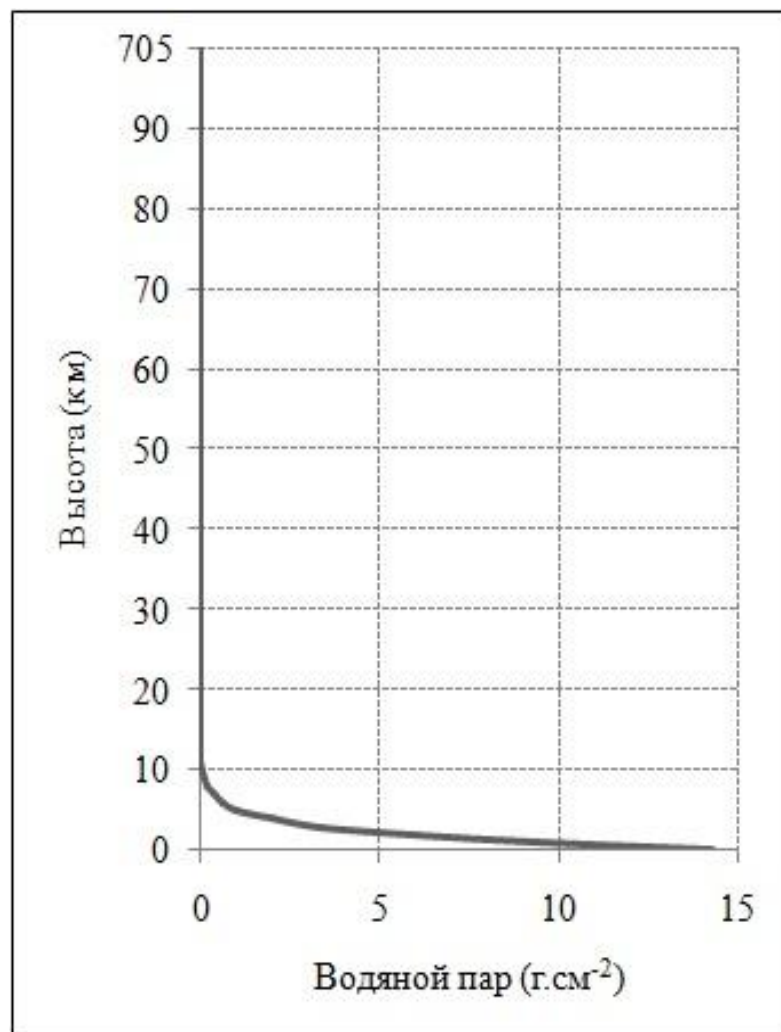


Рисунок 2.5 – График зависимости водяного пара (г.см^{-2}) атмосферы от высоты, согласно модели MODTRAN.

Анализ чувствительности к содержанию водяного пара: так как прозрачность атмосфера зависит от содержания водяного пара, поэтому ошибки оценки температуры земной поверхности происходят одновременно в каналах 10 и 11 аппаратуры космического аппарата Landsat 8. Таким образом, анализ чувствительности был проведен для содержания водяного пара, который служит в качестве входных данных модели MODTRAN. Точность оценки ТЗП практически зависит от температуры поверхности и содержания водяного пара в атмосфере.

Единицей измерения парциального давления водяного пара (W), полученной по модели «MODTRAN инфракрасный свет в атмосфере» является мбар. В случае оценки влажности атмосферы в других единицах следует воспользоваться конвертором физических величин [151].

2.7. Моделирование рельефа земной поверхности в границах провинции Хузестан

Рельеф провинции Хузестан получен по данным, полученным радиометром ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) спутника Terra [168]. Разрешение растрового представления высотных отметок составляет 30 м. Для дальнейшего анализа исходный материал преобразован в изолинейную и полигональную модели. Фрагмент изображения композиции этих моделей представлен на рисунке 2.7 [4,49].

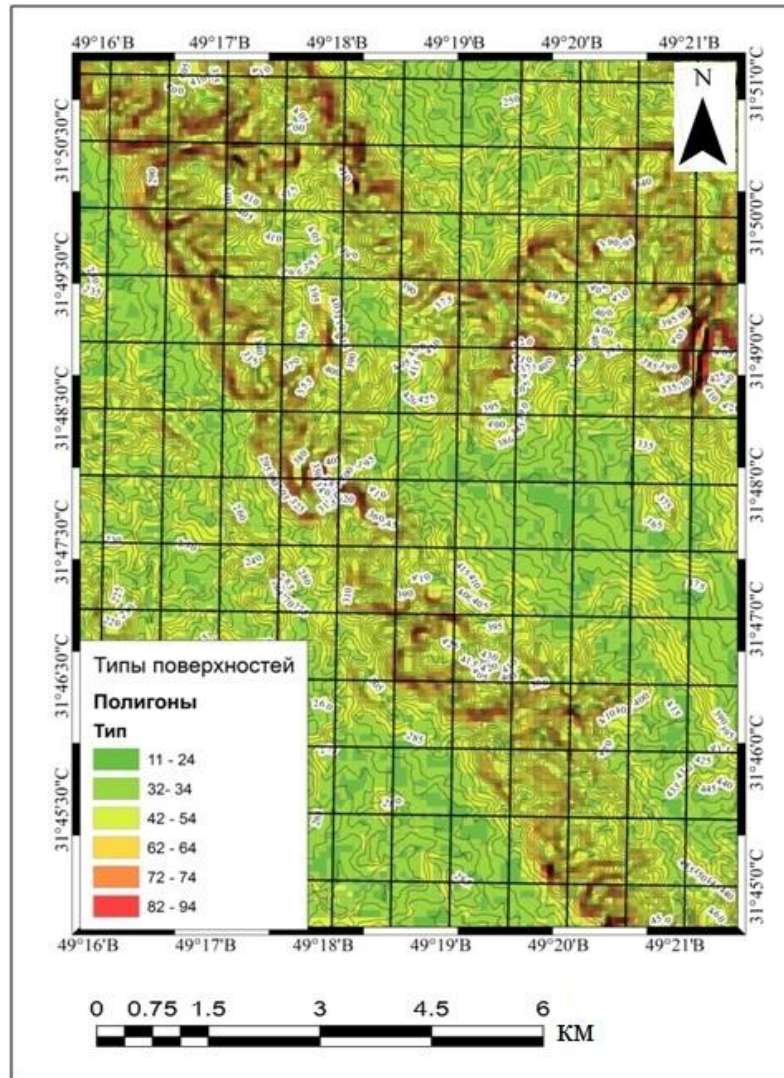


Рисунок 2.7 – Композиция изолинейной и полигональной моделей рельефа.
Фрагмент.

Типизация элементарных участков земной поверхности произведена в соответствии с диапазонами значений уклона (таблица 2.3), определяющих сельскохозяйственную пригодность угодий [128], а также по экспозиции – северной, южной, западной или восточной – определяющей величину солнечной инсоляции. На заключительном этапе полигоны каждого типа 11 – 94 в атрибутивной таблице представлены одной записью, что достигается выполнением функции редактора слияние, в результате чего все контура отдельного типа становятся одним объектом [21,56,62].

Таблица 2.3 – Типизация и статистика элементарных поверхностей.

№ типа	Индекс	Уклон	Экспозиция	Полигонов	км ²	%
1	11	Равнина	Равнина	54 685	488,2	0,76
2	22	до 1° или до 1,75%	Север	306 895	7022,7	10,97
3	23		Восток, Запад	322 714	15879,4	24,80
4	24		Юг	324 579	7903,5	12,34
5	32	от 1° до 3° или от 1,75° до 5,24%	Север	125 188	2586,8	4,04
6	33		Восток, Запад	246 845	6080,1	9,50
7	34		Юг	148 557	3474,4	5,43
8	42	от 3° до 6° или от 5,24% до 10,51%	Север	58 489	1170,4	1,83
9	43		Восток, Запад	123 429	2781,8	4,34
10	44		Юг	71 241	1567,6	2,45
11	52	от 6° до 10° или от 10,51% до 17,63%	Север	46 568	870,8	1,36
12	53		Восток, Запад	99 572	2028,2	3,17
13	54		Юг	56 838	1134,4	1,77
14	62	от 10° до 15° или от 17,63% до 26,79%	Север	37 724	725,1	1,13
15	63		Восток, Запад	80 137	1655,5	2,59
16	64		Юг	45 169	904,2	1,41
17	72	от 15° до 20° или от 26,79 0% до 36,40%	Север	28 901	519,0	0,81
18	73		Восток, Запад	62 690	1198,7	1,87
19	74		Юг	34 093	633,3	0,99
20	82	от 20° до 30° или от 36,40% до 57,74%	Север	19 553	749,2	1,17
21	83		Восток, Запад	40 171	1674,2	2,61
22	84		Юг	21 576	879,9	1,37
23	92	выше 30° или выше 57,74%	Север	5 458	500,9	0,78
24	93		Восток, Запад	11 495	1067,3	1,67
25	94		Юг	6 169	535,5	0,84
Сумма					64031,1	100,00

К особенностям рельефа провинции Хузестан следует отнести следующие показатели. Доля строго горизонтальной территории от общей площади

провинции составляет всего 0,76%, тогда как территория с уклоном до 1° занимает уже 48,87%. Если склоновые поверхности с углом падения свыше 30° составляют 3,29%, то общая территория с уклоном до 3° занимает наибольшую часть провинции, равную 67,83%. Площадь предгорной территории, с уклонами от 3° до 10°, активно используемой в сельском хозяйстве, составляет 14,92%.

Смысл полигонального представления рельефа определяется возможностью параметризации типов элементарных участков склоновых поверхностей значениями температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI, учитывая, что горизонтальные площади, включающие водохранилища, озера и болота, в провинции Хузестан, занимают менее 1%.

2.8. Анализ сезонной динамики полей температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI

В соответствии с предметом исследований основная задача анализа результатов спутниковой съемки картографируемой территории состоит в расчете некоторого интегрального показателя – индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов *Iind* – характеризующего типы формализовано выделенных элементарных поверхностей (элементарных морфологических единиц ландшафтов провинции Ирана Хузестан), административные районы этой провинции и территории определенных видов землепользования [34,36]. В качестве такого показателя принимается многокритериальная оценка, учитывающая сезонную динамику полуденной температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI. Вычисление *Iind* производится по формуле:

$$Iind = \sum C_m \cdot TЗП_m + \sum C_n \cdot NDVI_n, \quad (2.12.)$$

где, $\sum C_m + \sum C_n = 1$ – сумма коэффициентов взвешивания; m, n – номера сезонов, меняющиеся от 1 до 10.

В данном случае коэффициенты взвешивания являются элементами фиксации сезонной динамики показателей ТЗП_m и NDVI_n. Характер изменчивости C_m и C_n , а также соотношения между ними определяется и климатическими особенностями объекта исследования и значимостью этих двух характеристик состояния природных ландшафтов. Так как NDVI является прямым показателем фотосинтетической активности листового аппарата растительного сообщества, то его значимость в составе оценки *lind* выше, чем температурные условия местоположения элементарных поверхностей. Если фитомасса агрокультур и её ценность в течение вегетативного цикла растет, то значимость ТЗП в течение этого же цикла падает.

Собственно фактические значения ТЗП_m и NDVI_n для типов элементарных поверхностей находятся реализацией функции «Зональная статистика в таблицу» в ArcGIS. Примером табличного представления данных служат таблицы 2.4 и 2.5 [43,49].

Таблица 2.4 – Сезонная динамика нормированной полуденной радиационной температуры типов элементарных поверхностей.

Тип	Сезоны 2011 г.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	0,974	0,965	0,765	0,763	0,667	0,594	0,513	0,481	0,420	0,411
22	0,979	0,972	0,797	0,799	0,711	0,631	0,551	0,529	0,465	0,458
23	0,978	0,972	0,800	0,803	0,717	0,635	0,554	0,526	0,465	0,455
24	0,978	0,974	0,806	0,810	0,721	0,638	0,556	0,525	0,467	0,455
32	0,990	0,990	0,895	0,895	0,832	0,732	0,663	0,656	0,585	0,585
33	0,992	0,992	0,896	0,897	0,833	0,733	0,668	0,660	0,589	0,589
34	0,996	0,996	0,906	0,907	0,844	0,741	0,680	0,672	0,603	0,604
42	0,994	0,994	0,927	0,926	0,860	0,750	0,702	0,698	0,608	0,610
43	0,996	0,994	0,929	0,929	0,866	0,755	0,714	0,710	0,625	0,630
44	1,000	0,997	0,933	0,934	0,871	0,760	0,726	0,724	0,641	0,651
52	0,984	0,983	0,908	0,912	0,840	0,723	0,673	0,665	0,574	0,575
53	0,983	0,982	0,906	0,908	0,841	0,728	0,689	0,686	0,603	0,608
54	0,989	0,985	0,913	0,916	0,849	0,742	0,712	0,713	0,635	0,645

62	0,966	0,967	0,871	0,879	0,806	0,681	0,624	0,611	0,518	0,518
63	0,965	0,964	0,868	0,872	0,804	0,691	0,649	0,647	0,567	0,571
64	0,972	0,970	0,881	0,886	0,819	0,715	0,687	0,693	0,622	0,632
72	0,949	0,952	0,833	0,844	0,768	0,643	0,579	0,558	0,461	0,459
73	0,948	0,949	0,828	0,834	0,762	0,652	0,607	0,603	0,528	0,534
74	0,956	0,954	0,844	0,854	0,787	0,684	0,658	0,670	0,605	0,616
82	0,931	0,936	0,784	0,800	0,716	0,594	0,513	0,473	0,370	0,367
83	0,931	0,933	0,776	0,787	0,712	0,602	0,549	0,542	0,472	0,482
84	0,937	0,936	0,795	0,816	0,748	0,644	0,619	0,633	0,577	0,591
92	0,915	0,920	0,733	0,750	0,652	0,540	0,433	0,351	0,217	0,220
93	0,911	0,912	0,698	0,717	0,626	0,539	0,477	0,452	0,394	0,413
94	0,916	0,914	0,722	0,756	0,688	0,582	0,556	0,579	0,532	0,550

Таблица 2.5 – Сезонная динамика NDVI типов элементарных поверхностей.

Тип	Сезоны 2011 г.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	0,170	0,151	0,141	0,139	0,140	0,153	0,158	0,160	0,167	0,169
22	0,161	0,148	0,138	0,136	0,139	0,150	0,153	0,154	0,163	0,164
23	0,166	0,148	0,138	0,135	0,139	0,148	0,153	0,156	0,166	0,167
24	0,169	0,149	0,139	0,136	0,140	0,148	0,154	0,158	0,170	0,170
32	0,130	0,126	0,120	0,121	0,125	0,129	0,126	0,126	0,134	0,135
33	0,130	0,124	0,118	0,119	0,125	0,128	0,124	0,125	0,134	0,135
34	0,130	0,122	0,116	0,118	0,125	0,126	0,123	0,124	0,133	0,134
42	0,128	0,119	0,113	0,115	0,118	0,121	0,119	0,121	0,126	0,128
43	0,125	0,115	0,110	0,113	0,118	0,119	0,117	0,119	0,124	0,126
44	0,124	0,112	0,107	0,111	0,117	0,118	0,116	0,118	0,123	0,125
52	0,143	0,129	0,123	0,124	0,124	0,131	0,130	0,134	0,142	0,144
53	0,138	0,125	0,119	0,121	0,125	0,128	0,127	0,131	0,137	0,139
54	0,133	0,121	0,115	0,117	0,124	0,126	0,124	0,126	0,132	0,133
62	0,162	0,147	0,141	0,140	0,138	0,147	0,148	0,157	0,168	0,171
63	0,153	0,140	0,134	0,134	0,137	0,143	0,142	0,148	0,157	0,158
64	0,142	0,132	0,127	0,126	0,132	0,137	0,135	0,138	0,144	0,144
72	0,182	0,168	0,162	0,158	0,155	0,166	0,169	0,185	0,202	0,205
73	0,167	0,157	0,151	0,148	0,149	0,158	0,158	0,168	0,179	0,180
74	0,151	0,143	0,138	0,136	0,140	0,148	0,147	0,150	0,156	0,156
82	0,201	0,189	0,185	0,177	0,174	0,188	0,192	0,218	0,242	0,246
83	0,181	0,173	0,168	0,162	0,162	0,173	0,175	0,189	0,203	0,205
84	0,160	0,155	0,150	0,146	0,149	0,161	0,160	0,163	0,169	0,168
92	0,193	0,187	0,181	0,180	0,179	0,193	0,194	0,217	0,243	0,250
93	0,189	0,185	0,177	0,174	0,175	0,184	0,187	0,202	0,220	0,223
94	0,171	0,167	0,162	0,158	0,163	0,174	0,175	0,177	0,183	0,181

Замечательные особенности сезонной изменчивости ТЗП и NDVI явно наблюдаются на ниже представленных графиках (рисунки 2.8, 2.9).

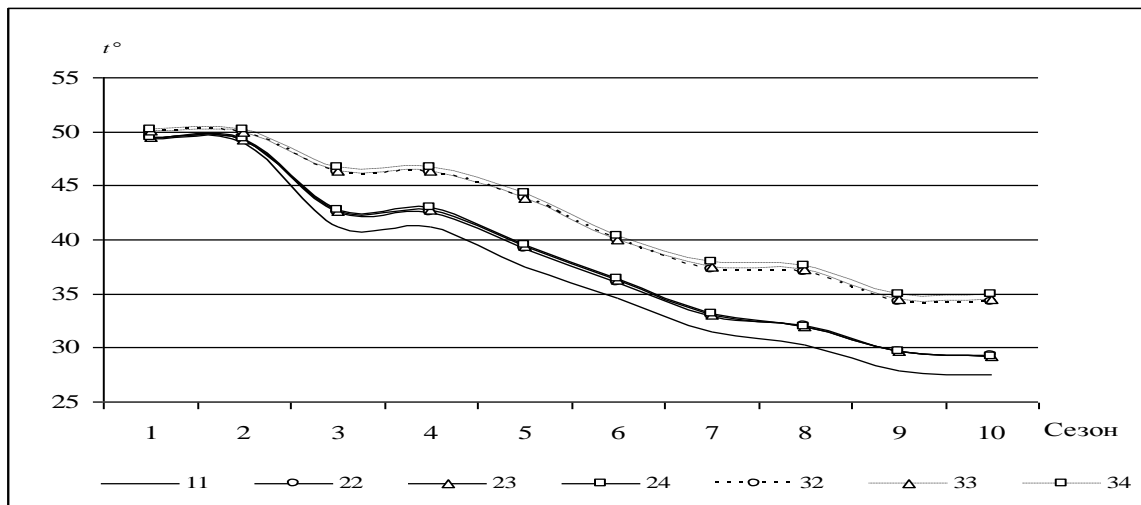


Рисунок 2.8 – Сезонная изменчивость радиационной температуры типов элементарных поверхностей 11 – 34 в 2011 г.

Обращает на себя внимание факт того, что элементарные поверхности различных углов падения четко разделяются как по температуре, так и по значению вегетационного индекса. Вместе с тем, по изменению ТЗП и NDVI от сезона к сезону хорошо видно, что корреляции между частными показателями *Iind* не существует.

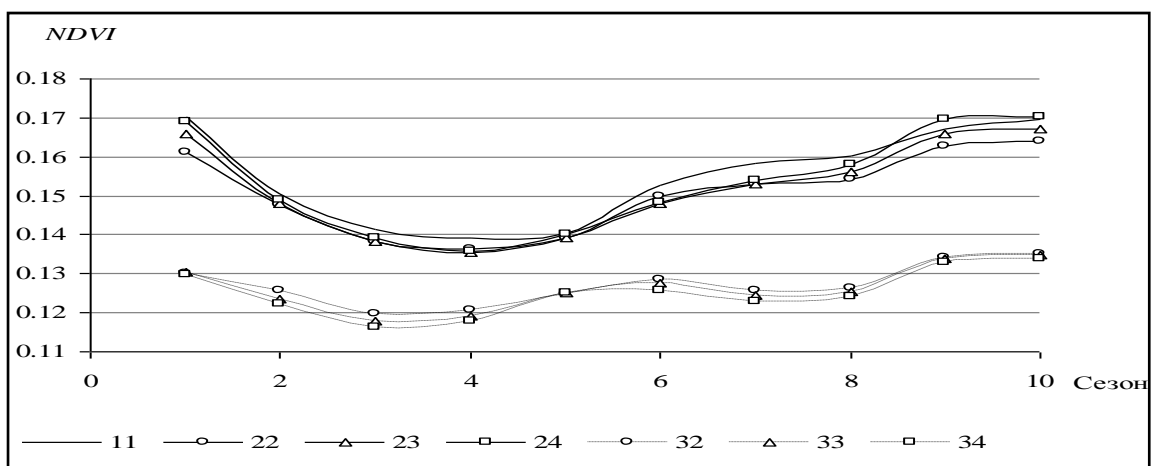


Рисунок 2.9 – Сезонная изменчивость NDVI в пределах типов элементарных поверхностей 11 – 34 в 2011 г.

Сравнивая представленные рисунки 2.10 и 2.11 не трудно сделать вывод о том, что в разные годы характер поведения кривых разный. Это означает, что, во-первых, для осреднения сезонной динамики *Iind* требуется статистически представительная база данных за представительный ряд лет, во-вторых, принимать во внимание критические значения сходства рядов данных при задаваемой критической вероятности [62,64].

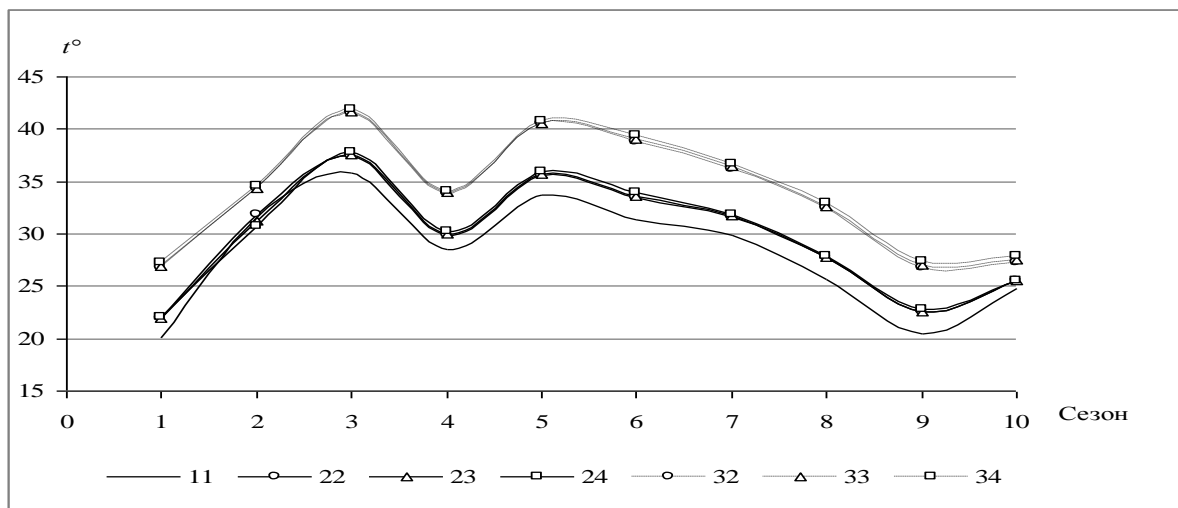


Рисунок 2.10 – Сезонная изменчивость радиационной температуры типов элементарных поверхностей 11 – 34 в 2016 г.

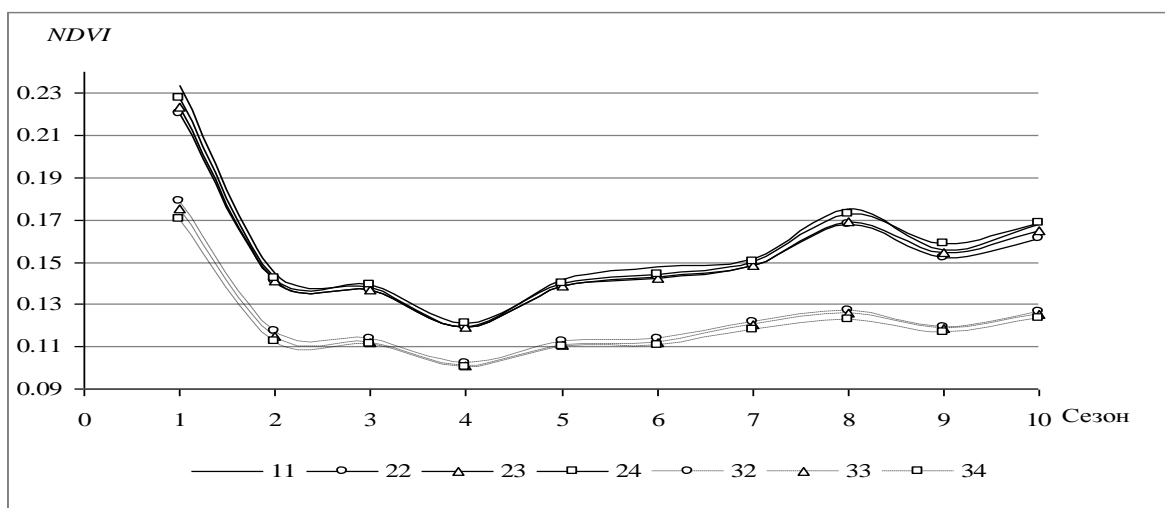


Рисунок 2.11. Сезонная изменчивость NDVI в пределах элементарных поверхностей 11 – 34 в 2016 г.

Для проверки температурных контрастов элементарных поверхностей с учетом характера растительности 20, 22, 29 июля и 5, 14 августа 2016 года были выполнены полевые работы. Результаты полевых изысканий приведены в таблице 2.6. Инструментальные наблюдения заключались в измерении температуры земной поверхности ТЗП, в фотографировании элементов форм рельефа, координировании точки фотографирования (широта φ , долгота λ) с указанием азимута направления съемки α и в регистрации направления использования территории. Площадки полевых наблюдений охватывают типовой набор элементарных поверхностей. Температура земной поверхности измерялась радиометром SMT160, точность прибора составляет $\pm 0,7$ °С, диапазон измерения от -45 °С до 130 °С, линейная зависимость температуры ТЗП от сигнала рабочего цикла (Duty Cycle (DC)) датчика определяется формулой:

$$T_{ЗП} \text{ } ^\circ\text{C} = \frac{DC - 0,32}{0,0047} \quad (2.13.)$$

Таблица 2.6 – Площадки полевых наблюдений в июле и августе 2016 г.

№	Дата	α	φ	λ	Характер поверхности, вид землепользования	ТЗП °С, (SMT160)	ТЗП °С, (Landsat 8)
1	20 Июля 2016	90	31°29'31"	48°37'54"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых.	40,6	39,4
2	20 Июля 2016	90	31° 37' 1"	48° 36' 55"	Равнина. Пашни, культивирование бобовых. Пастбища, луговое разнотравье.	36,1	35,2
3	20 Июля 2016	80	31° 38' 10"	48° 36' 31"	Равнина. Пастбища, кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	37,2	36,7
4	20 Июля 2016	45	31° 41' 39"	48° 33'	Равнина. Пастбища, кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	34,2	33,0

5	20 Июля 2016	45	31° 44' 35"	48° 30' 5"	Равнина. Пастбища, кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	29,8	28,4
6	20 Июля 2016	45	31° 50' 28"	48° 21' 44"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых. Пастбища, аридные кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	29,0	27,4
7	20 Июля 2016	135	31° 52' 8"	48° 21' 24"	Равнина. Рисовые поля.	26,4	24,9
8	20 Июля 2016	40	31° 52' 6"	48° 21' 19"	Равнина. Пашня, культивирование зерновых.	25,2	23,5
9	20 Июля 2016	90	31° 55' 54"	48° 18' 34"	Равнина. Преимущественно пашни, культивирование зерновых.	39,1	37,3
10	20 Июля 2016	80	32° 0' 32"	48° 17' 42"	Равнина. Преимущественно пашни, культивирование зерновых.	25,0	23,4
11	20 Июля 2016	120	32° 1' 55"	48° 17' 45"	Равнина. Пятна суглинистых пустошей, редины аридных кустарников,	30,9	29,6
12	20 Июля 2016	90	32° 4' 14"	48° 18' 1"	Равнина. Пашни, аридные кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	30,9	29,7
13	20 Июля 2016	0	32° 5' 41"	48° 17' 59"	Равнина. Пашни, аридные кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	21,3	21,3
14	20 Июля 2016	60	32° 8' 29"	48° 17' 20"	Равнина. Рисовые поля.	35,1	34,7
15	20 Июля 2016	45	32° 16' 32"	48° 13' 59"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых.	32,1	30,5
16	20 Июля 2016	45	32° 20' 52"	48° 12' 51"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых.	23,3	22,1

17	20 Июля 2016	270	32° 12' 42"	48° 16' 43"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых.	36,0	35,8
18	20 Июля 2016	270	32° 12' 52"	48° 17' 9"	Равнина. Пашни, аридные кустарниковые и полукустарниковые сообщества.	25,0	24,4
19	20 Июля 2016	45	32° 13' 19"	48° 19' 3"	Равнина. Пашня, куртины аридных кустарников.	29,1	27,2
20	20 Июля 2016	160	32° 14' 31"	48° 20' 20"	Равнина. Ксерофильный широколиственный смешанный лес.	22,9	22,2
21	20 Июля 2016	160	32° 14' 40"	48° 21' 7"	Равнина. Пашня, культивирование бобовых.	23,9	22,3
22	20 Июля 2016	150	32° 14' 47"	48° 21' 40"	Равнина. Пашня, кукурузная плантация.	21,9	21,1
23	20 Июля 2016	45	32° 16' 33"	48° 24' 48"	Равнина. Культивирование пропашных культур, фруктовые сады.	24,1	22,9
24	20 Июля 2016	180	32° 16' 38"	48° 25' 42"	Равнинный мелкосопочник, плотно покрытый травяно- кустарниковыми сообществами.	26,8	26,5
25	20 Июля 2016	210	32° 16' 40"	48° 25' 38"	Равнина. Пашни, редкие куртины древесных ксерофитов.	28,1	26,2
26	20 Июля 2016	10	32° 17' 42"	48° 26' 6"	Равнина. Фруктовые сады.	30,0	28,6
27	22 Июля 2016	180	30° 34' 58"	50° 15' 7"	Равнина. Пашни, финиковые пальмовые плантации.	40,5	39,3
28	22 Июля 2016	320	30° 37' 15"	50° 14' 12"	Равнина. Культивирование пропашных культур.	36,1	35,2
29	22 Июля 2016	180	30° 37' 1"	50° 12' 41"	Равнина. Культивирование пропашных культур.	41,3	40,5
30	22 Июля 2016	205	30° 36' 45"	50° 12' 15"	Равнина. Пашни, финиковые пальмовые плантации.	42,3	40,9

31	22 Июля 2016	250	30° 47' 35"	49° 54' 36"	Равнина. Рединные заросли кустарниковых видов тамарикса.	39,1	37,7
32	22 Июля 2016	260	30° 47' 58"	49° 54' 20"	Равнина. Газовый промысел. Единичные кустарники тамарикса.	39,3	38,1
33	22 Июля 2016	190	31° 15' 54"	49° 24' 48"	Слабонаклонное предгорье. Одиночно распределенные кустарничковые формы ксерофитов.	41,8	40,5
34	22 Июля 2016	25	31° 16' 4"	49° 24' 21"	Слабонаклонное предгорье. Одиночно распределенные кустарничковые формы ксерофитов.	42,1	41,3
35	22 Июля 2016	180	31° 14' 20"	49° 6' 44"	Равнина. Пашня, кукурузная плантация.	42,1	40,9
36	29 Июля 2016	280	31° 6' 18"	48° 35' 31"	Равнина. Одиночно распределенные кустарничковые формы ксерофитов.	37,0	36,2
37	29 Июля 2016	275	31° 0' 6"	48° 32' 40"	Слабонаклонное предгорье. Одиночные кустарничковые формы ксерофитов.	39,8	38,1
38	29 Июля 2016	285	30° 54' 43"	48° 30' 50"	Равнина. Суглинистая пустошь с одиночными редко встречающимися кустарничковыми формами ксерофитов.	40,4	38,8
39	29 Июля 2016	275	30° 51' 41"	48° 29' 53"	Мелководный водоем с одиночными кустарничковыми формами ксерофитов.	39,9	38,1
40	29 Июля 2016	185	30° 50' 52"	48° 29' 30"	Равнина. Финиковая пальмовая плантация.	34,5	34,2
41	29 Июля 2016	275	30° 38' 4"	48° 22' 55"	Равнина. Суглинистая пустошь с одиночными редко встречающимися кустарничковыми формами ксерофитов.	37,9	37,8

42	29 Июля 2016	275	30° 28' 19"	48° 18' 37"	Равнина. Суглинистая пустошь с одиночными редко встречающимися кустарничковыми формами ксерофитов.	40,0	39,1
43	29 Июля 2016	270	30° 26' 42"	48° 18' 13"	Равнина. Суглинистая пустошь.	38,9	38,1
44	29 Июля 2016	95	30° 26' 4"	48° 18' 6"	Равнина. Куртины с разной плотностью распространения кустарничковых форм ксерофитов.	39,7	38,4
45	29 Июля 2016	85	30° 29' 12"	48° 18' 59"	Группа мелководных водоемов с одиночными кустарничковыми формами ксерофитов.	39,0	37,4
46	29 Июля 2016	100	30° 36' 10"	48° 22' 20"	Группа мелководных водоемов с одиночными кустарничковыми формами ксерофитов.	38,8	38,8
47	29 Июля 2016	170	30° 42' 39"	48° 28' 46"	Куртины тростниковых заболоченных зарослей.	33,0	32,3
48	29 Июля 2016	220	30° 41' 22"	48° 30' 38"	Куртины тростниковых заболоченных зарослей.	34,1	32,3
49	29 Июля 2016	0	30° 41'	48° 31' 47"	Болотно-озерные комплексы с куртинами кустарниковых и тростниковых зарослей.	33,6	32,3
50	29 Июля 2016	40	30° 42' 49"	48° 28' 35"	Болотно-озерные комплексы с куртинами кустарниковых и тростниковых зарослей.	34,8	34,5
51	05 Августа 2016	300	32° 23' 6"	48° 23' 46"	Речная долина с селитебной застройкой. Река Дез. Город Дизфуль.	19,1	18,7

52	05 Августа 2016	235	32° 24' 18"	48° 24' 29"	Глубоко врезанная речная долина, лишенная растительности.	18,4	17,6
53	05 Августа 2016	135	32° 24' 15"	48° 24' 30"	Равнина. Антропогенная парковая растительность.	16,7	16,1
54	05 Августа 2016	135	32° 31' 47"	48° 30' 41"	Речная долина с эродированными склонами и степной ксерофильной растительностью.	40,5	39,2
55	05 Августа 2016	90	32° 33'	48° 30' 10"	Горная гряда со степной ксерофильной растительностью.	39,9	39,2
56	05 Августа 2016	90	32° 34' 17"	48° 31' 12"	Горная долина с эродированными склонами и степной ксерофильной растительностью.	40,6	40,5
57	05 Августа 2016	45	32° 34' 54"	48° 31' 16"	Предгорная долина лишенная растительности.	38,9	38,1
58	05 Августа 2016	135	32° 35' 40"	48° 32' 39"	Горная гряда с широко распространенными куртинами степной ксерофильной растительности.	38,9	38,1
59	05 Августа 2016	180	32° 37' 14"	48° 30' 4"	Пустынно каменистый склон горной гряды с одиночными кустарничками ксерофильной растительности.	40,0	38,5
60	05 Августа 2016	180	32° 37' 30"	48° 29' 7"	Пустынно каменистый склон горной гряды с одиночными кустарничками ксерофильной растительности.	35,0	34,9

61	05 Августа 2016	280	32° 37' 35"	48° 29' 9"	Озерная межгорная котловина, с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	36,5	36,0
62	05 Августа 2016	325	32° 37' 35"	48° 29' 4"	Межгорная котловина с водохранилищем на русле реки Дез с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	26,8	26,3
63	05 Августа 2016	0	32° 37' 38"	48° 29' 6"	Межгорная котловина с водохранилищем на русле реки Дез с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	25,9	25,3
64	05 Августа 2016	270	32° 37' 40"	48° 28' 47"	Межгорная котловина с водохранилищем на русле реки Дез с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	32,9	32,0
65	05 Августа 2016	270	32°37'38"	48°28'51"	Межгорная котловина с водохранилищем на русле реки Дез с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	37,0	36,4
66	05 Августа 2016	170	32°37'38"	48°28'54"	Промзона в межгорной котловине.	39,8	38,1
67	05 Августа 2016	320	32°36'23"	48°33'30"	Пустынно каменистый склон горной гряды.	39,1	37,7

68	05 Августа 2016	320	32°34'55"	48°31'16"	Пустынно каменистый склон горной гряды с одиночными кустарничками и рединами ксерофильной растительности.	40,0	39,1
69	05 Августа 2016	270	32°32'38"	48°30'8"	Пустынно каменистый склон горной гряды с одиночными кустарничками и рединами ксерофильной растительности.	39,9	38,8
70	05 Августа 2016	270	32°32'30"	48°30'9"	Пустынно каменистый склон горной гряды с одиночными кустарничками и рединами ксерофильной растительности.	40,0	38,8
71	05 Августа 2016	270	32°28'12"	48°30'47"	Пустынно каменистое предгорье с одиночными кустарничками и рединами ксерофильной растительности.	40,1	38,9
72	05 Августа 2016	260	32°23'24"	48°23'47"	Долина с водохранилищем на русле реки Дез с одиночными деревьями, кустарниками и кустарничками ксерофильной растительности.	23,1	21,8
73	14 Августа 2016	210	31°15'29"	48°53'39"	Равнинное предгорье. Селитебная застройка и куртины кустарников ксерофильной растительности.	34,4	34,3

74	14 Августа 2016	230	31° 14' 25"	48° 55' 28"	Равнинное предгорье. Селитебная застройка и куртины кустарников ксерофильной растительности.	33,8	33,4
75	14 Августа 2016	210	31°13'59"	49°8'51"	Равнина. Куртины полупустынной кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	33,6	33,4
76	14 Августа 2016	210	31° 13' 54"	49° 9' 10"	Равнина. Куртины зарослей кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	35,9	34,6
77	14 Августа 2016	135	31°14'9"	49°10'1"	Равнина. Редины кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	35,8	35,4
78	14 Августа 2016	90	31°14'36"	49°10'26"	Равнина. Редины кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	35,2	35,0
79	14 Августа 2016	180	31°14'57"	49°11'52"	Равнина. Пашни, культивирование зерновых.	34,3	34,2
80	14 Августа 2016	230	31°17'22"	49°17'32"	Предгорье. Куртинные заросли кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	38,1	37,0
81	14 Августа 2016	100	31° 18' 13"	49° 18' 36"	Предгорье. Куртинные заросли кустарниковой и кустарничковой ксерофильной растительности.	36,7	35,0
82	14 Августа 2016	100	31°18'42"	49°18'43"	Равнина. Одиночные древесные, кустарниковые и кустарничковые формы ксерофильной растительности.	35,9	35,0

83	14 Августа 2016	135	31° 24' 35"	49° 23' 44"	Предгорная каменистая пустыня с одиночными кустарничковыми формами ксерофильной растительности.	35,0	34,6
84	14 Августа 2016	225	31° 31' 30"	49° 45'	Предгорная каменистая пустыня с рединами кустарничковых форм ксерофильной растительности.	35,3	34,7
85	14 Августа 2016	135	31°31'25"	49°51'41"	Предгорная каменистая пустыня с рединами и куртинами кустарниковых и кустарничковых форм ксерофильной растительности.	32,4	30,9
86	14 Августа 2016	35	31°44'19"	49°48'34"	Предгорная каменистая пустыня с рединами и куртинами кустарниковых и кустарничковых форм ксерофильной растительности.	33,5	33,0
87	14 Августа 2016	180	31°22'42"	49°43'55"	Предгорная равнина. Рисовая плантация.	27,5	27,1
88	14 Августа 2016	80	31°22'38"	49°49'30"	Предгорная равнина. Рисовая плантация.	24,4	23,8
89	14 Августа 2016	310	31°46'59"	49°50'55"	Равнина. Редины кустарничковых форм ксерофильной растительности.	34,3	33,4
90	14 Августа 2016	225	31° 44' 57"	49° 48' 20"	Предгорье. Одиночные кустарничковые формы ксерофильной растительности.	32,0	31,3
91	14 Августа 2016	225	31° 43' 15"	49° 49' 27"	Горный каменисто пустынный склон.	32,0	31,7

92	14 Августа 2016	270	31° 26' 29"	49°25'25"	Равнина. Редины травяно- кустарничковых формы ксерофильной растительности.	36,7	35,4
93	14 Августа 2016	45	31° 14' 3"	49° 9' 18"	Равнина. Редины травяно- кустарничковых формы ксерофильной растительности.	33,6	33,0
94	14 Августа 2016	0	31° 15' 7"	48°57'27"	Равнина. Редины травяно- кустарничковых формы ксерофильной растительности.	35,4	34,6

Коэффициент парной корреляции r между полуденными температурами, полученными радиометром SMT160 и аппаратурой спутника Landsat 8 равен 0,997, ошибка m вычисления r составляет 0,066, отношение r/m равно 15,129, что свидетельствует о практически полном совпадении двух рядов данных.

Другой способ проверки температурных контрастов природно-территориальных комплексов заключался в сопоставлении спутниковых измерений и измерений на режимных метеостанциях (таблица 2.7) [126].

Таблица 2.7 – Температура земной поверхности по данным метеорологических станций и спутниковым данным для 10 сезонов 2011 – 2015 гг.

Метео- станция	Ахваз	Дизфуль	Изе	Масджед- Солейман	Бостан	Шушгер	Абадан	Рамхормоз	Бендер-Махшехр	Бехбехан	Омидийех	Агаджери	Сафи Абад	Хендиджан
Широта	31° 20'	32° 24'	31° 51'	31° 56'	31° 43'	32° 03'	30° 22'	31° 16'	30° 33'	30° 36'	30° 46'	30° 46'	32° 16'	30° 14'

Долгота		48° 40'	48° 23'	49° 52'	49° 17'	48° 00'	48° 50'	48° 15'	49° 36'	49° 09'	50° 14'	49° 39'	49° 40'	48° 25'	49° 42'	
Наземные измерения температуры, t°С	Сезоны 2011 г.	1	46,2	49,9	46,7	48,6	48,2	48,1	48,0	49,4	50,5	47,7	49,0	47,9	45,4	47,5
		2	46,8	50,4	45,6	48,4	48,6	47,9	47,9	49,6	50,5	46,8	48,9	48,6	47,0	46,9
		3	43,5	48,2	45,0	45,9	45,5	42,6	44,6	47,2	45,5	44,6	45,1	45,0	44,8	45,1
		4	42,5	48,9	44,7	45,2	44,9	42,9	44,4	47,5	45,5	45,5	44,8	44,0	45,5	44,8
		5	40,1	47,0	36,8	42,4	42,9	44,6	46,4	37,4	46,2	44,0	43,5	42,0	30,7	39,0
		6	38,6	40,9	40,5	37,4	38,1	40,0	41,0	42,4	41,9	40,8	40,5	37,6	32,8	34,9
		7	33,1	38,6	39,3	34,0	39,5	34,9	38,7	41,6	39,8	39,0	38,1	35,0	24,0	33,1
		8	32,6	37,8	38,8	34,6	37,9	34,8	38,5	44,4	39,6	37,9	38,4	35,0	25,8	33,1
		9	31,1	37,0	36,1	28,9	37,4	31,4	37,3	40,2	36,6	34,7	34,1	29,7	24,1	31,0
		10	30,3	35,1	36,3	29,1	35,7	31,6	37,4	40,3	36,6	35,1	34,4	34,9	22,0	32,7
	Сезоны 2012 г.	1	35,1	42,8	30,7	38,7	37,8	40,9	39,9	43,6	42,3	30,1	42,0	38,6	25,9	34,9
		2	36,0	44,5	30,8	39,1	35,7	41,8	38,2	43,7	43,5	31,7	41,1	36,1	27,1	35,7
		3	40,3	45,6	38,0	43,2	45,5	42,5	43,9	46,4	46,0	40,9	45,5	42,9	38,3	42,6
		4	42,2	45,9	39,9	43,3	39,2	42,0	43,9	46,1	46,0	46,0	45,9	43,7	32,5	41,7
		5	42,9	42,4	46,1	43,7	39,9	42,0	44,7	45,4	45,5	40,0	47,8	43,8	32,5	41,0
		6	44,3	46,2	42,6	41,9	44,5	41,9	46,9	45,9	48,6	38,4	47,0	42,4	32,0	39,8
		7	38,0	42,7	44,0	40,1	43,9	42,3	42,3	45,9	46,1	39,0	45,6	41,6	30,5	39,8
		8	36,9	39,3	40,9	34,6	39,6	37,7	42,5	42,9	39,6	37,6	38,6	37,4	27,7	36,1
		9	30,5	34,8	37,5	28,7	31,9	32,3	34,6	36,7	34,9	32,5	33,9	31,9	24,1	32,0
		10	29,5	34,0	36,7	28,9	32,4	32,9	34,6	36,0	35,2	32,9	33,2	32,4	23,2	29,9
	Сезоны 2013 г.	1	40,5	44,0	44,9	44,5	39,1	42,3	39,0	46,8	46,7	41,4	44,5	41,0	30,0	36,8
		2	39,9	45,9	46,3	45,3	41,4	45,7	44,9	48,9	48,9	44,0	47,8	43,5	32,0	41,5
		3	39,1	47,3	46,4	44,9	44,8	45,2	44,5	49,0	49,6	46,1	48,5	42,9	31,6	41,9
		4	36,0	46,4	50,9	41,0	44,8	43,1	44,8	46,5	48,5	45,9	47,1	44,1	29,5	33,5
		5	38,1	44,4	43,7	40,1	44,3	42,5	42,7	46,9	45,8	37,7	46,9	41,6	32,7	38,9
		6	42,0	44,8	46,0	36,4	44,1	44,6	41,8	48,2	45,6	43,1	46,6	43,2	33,5	39,3
		7	33,9	36,6	42,1	30,9	30,8	37,6	36,1	43,4	39,2	31,5	38,4	35,7	26,0	34,0
		8	32,5	32,1	38,9	22,0	35,7	34,1	35,4	38,3	38,6	30,0	37,1	33,5	29,6	32,0
		9	25,8	24,6	27,7	22,4	25,7	29,6	30,1	36,6	26,1	22,8	29,7	26,8	12,9	23,9
		10	24,9	23,9	27,4	23,0	22,6	29,8	29,8	36,6	33,8	21,1	28,9	23,6	11,2	23,9
	Сезоны 2014 г.	1	28,8	37,9	24,6	33,4	29,6	35,4	28,9	37,1	37,0	27,0	32,7	28,7	32,2	29,1
		2	28,7	42,1	27,8	37,8	30,1	37,8	32,0	40,1	42,5	32,1	37,0	33,8	39,9	31,0
		3	33,5	41,4	31,1	38,1	38,0	37,0	35,3	40,9	41,3	32,9	38,6	34,7	26,7	32,1
		4	32,9	41,5	36,4	42,5	33,4	40,7	39,5	44,4	46,8	37,8	42,2	37,0	25,5	38,7
		5	29,7	42,4	38,1	39,9	39,2	36,4	37,8	42,1	45,6	36,2	40,4	35,9	28,3	36,8
		6	33,1	33,0	32,8	34,5	27,1	29,7	33,5	33,5	36,0	32,2	33,0	31,9	26,3	30,8

Спутниковые измерения температуры, t°С	Сезоны 2015 г.	7	33,2	39,9	39,0	39,6	42,8	38,9	39,6	44,3	45,5	30,9	39,9	37,8	30,7	36,4
		8	27,4	38,0	36,0	34,9	35,6	33,9	35,1	40,4	45,5	29,4	36,8	34,6	24,6	30,9
		9	19,9	31,1	32,0	29,9	29,0	27,6	30,3	37,0	36,5	23,9	31,0	28,0	19,9	28,5
		10	18,6	25,9	30,1	20,1	26,3	21,8	25,5	30,5	28,7	21,5	25,4	22,8	15,1	22,9
		1	26,3	32,1	16,0	25,8	23,7	28,6	22,2	34,0	33,0	21,7	28,5	26,8	29,4	23,8
		2	29,0	37,6	25,6	33,9	31,0	35,0	28,9	39,0	42,0	36,7	35,9	27,9	19,0	32,8
		3	37,1	41,5	33,0	37,6	33,6	35,0	32,9	42,0	42,8	32,0	39,0	34,3	29,6	32,7
		4	49,7	39,6	39,1	32,7	37,7	33,4	34,5	42,2	44,5	35,1	38,4	36,3	27,0	35,0
		5	23,3	41,2	41,6	40,1	36,5	40,1	38,3	45,5	46,9	36,9	40,0	37,6	25,3	35,9
		6	25,8	48,7	43,9	39,9	36,8	39,1	37,8	44,1	46,7	35,7	42,9	39,3	27,9	36,3
	7	39,1	36,4	45,8	39,6	36,9	36,5	38,1	45,0	47,2	37,0	41,8	38,7	23,8	35,9	
	8	29,5	36,0	37,5	33,8	31,5	34,2	34,9	41,6	43,5	31,8	35,9	34,0	22,6	32,4	
	9	18,5	32,5	35,9	29,0	33,1	29,0	30,5	37,4	35,7	25,1	32,6	29,8	18,5	27,4	
	10	25,6	31,1	32,0	27,9	26,9	29,5	29,9	36,9	35,5	26,6	31,0	29,3	26,1	27,5	
	Сезоны 2011 г.	1	47,2	51,1	47,9	49,6	49,3	49,3	49,0	50,3	51,7	48,6	50,0	48,9	46,6	48,4
		2	47,9	51,5	46,8	49,3	49,6	49,1	48,9	50,6	51,6	47,9	49,9	49,6	48,1	48,3
		3	44,5	49,5	46,2	46,8	46,8	43,8	45,9	48,1	46,4	45,5	46,0	46,0	46,0	46,1
		4	43,4	50,1	46,0	46,4	46,0	44,0	45,5	48,5	46,4	46,4	45,9	45,1	46,4	45,9
		5	41,2	48,3	38,1	43,4	43,8	46,0	47,7	38,5	47,2	45,1	44,5	43,0	32,1	40,2
		6	39,4	42,0	41,6	38,5	39,4	41,2	42,1	43,4	43,0	42,1	41,4	38,5	33,8	36,0
		7	34,3	39,8	40,6	35,3	40,7	36,2	39,9	42,4	40,7	40,2	39,1	36,2	25,2	34,2
		8	33,4	38,9	40,2	35,7	38,9	36,0	39,8	45,4	40,7	38,9	39,3	36,2	26,7	34,3
		9	32,4	37,9	37,3	30,1	38,4	32,5	38,6	41,1	37,6	35,7	35,3	30,6	25,2	32,1
		10	31,5	36,2	37,5	30,0	36,6	32,9	38,4	41,2	37,5	36,2	35,5	35,7	23,2	33,6
	Сезоны 2012 г.	1	36,2	43,5	32,0	39,9	39,0	42,1	41,2	44,7	43,4	31,2	43,0	39,4	26,8	36,0
		2	37,2	45,5	32,1	40,1	36,7	42,5	39,4	44,9	44,7	32,6	42,1	37,2	28,3	36,6
		3	41,5	46,7	39,5	44,2	46,4	43,4	45,3	47,2	47,3	41,6	46,4	43,8	39,4	44,0
		4	43,4	47,0	41,2	44,6	40,3	43,3	45,1	47,1	47,2	46,8	46,8	44,7	33,5	43,0
		5	44,1	43,5	47,2	44,7	41,2	43,1	46,0	46,4	46,4	41,2	48,6	44,7	33,5	42,2
		6	45,5	47,3	43,8	43,0	45,5	43,0	48,1	47,2	49,7	39,4	47,9	43,4	33,0	40,7
7		39,0	43,9	45,1	41,2	45,1	43,4	43,4	46,8	47,2	39,9	46,7	42,5	31,3	41,0	
8		38,4	40,6	42,0	35,7	40,7	38,9	43,7	43,7	40,7	38,4	39,6	38,4	28,7	37,3	
9		31,6	36,0	38,5	29,6	32,9	33,4	35,8	38,0	36,1	33,4	34,9	32,9	25,2	32,9	
10		30,6	35,1	38,0	30,1	33,4	34,0	35,7	37,1	36,2	33,9	34,1	33,4	24,2	30,9	
Сезоны 2013 г.	1	41,5	45,3	46,3	45,4	40,2	43,3	40,2	48,0	47,6	42,4	45,4	42,0	31,1	37,9	
	2	40,8	47,1	47,7	46,4	42,5	46,8	45,6	50,2	49,7	45,1	48,8	44,7	33,0	42,5	
	3	40,3	48,4	47,7	46,0	45,7	46,3	45,5	50,1	50,6	47,2	49,5	43,8	32,7	42,9	
	4	37,2	47,5	52,2	42,1	46,0	44,2	46,0	47,7	49,7	46,8	48,3	45,2	30,7	34,4	
	5	39,2	45,3	44,7	41,2	45,4	43,4	43,8	47,8	46,8	38,5	47,8	42,5	34,0	40,1	

	6	43,0	46,0	47,2	37,5	45,1	45,5	43,0	49,3	46,4	44,2	47,5	44,2	34,4	40,3	
	7	34,8	37,6	43,3	32,0	32,0	38,4	37,1	44,6	40,2	32,5	39,4	36,6	27,2	35,1	
	8	33,4	33,3	40,2	23,2	36,6	35,3	36,6	39,3	39,8	31,1	38,0	34,4	30,6	33,0	
	9	27,0	25,9	29,0	23,6	26,7	30,6	30,8	37,5	27,2	23,7	30,7	27,7	13,8	24,8	
	10	26,2	25,1	28,7	24,0	23,7	30,8	30,6	37,6	34,8	22,2	29,9	24,7	12,1	24,8	
	Сезоны 2014 г.	1	29,7	38,9	25,6	34,4	30,5	36,4	30,0	38,2	38,1	28,1	33,6	29,7	33,1	30,2
		2	29,8	43,4	29,2	38,8	31,1	38,9	33,1	41,0	43,6	33,0	38,2	34,8	40,9	32,2
		3	34,3	42,5	32,2	39,4	39,2	38,0	36,6	42,2	42,3	34,2	39,6	35,6	27,7	33,3
		4	34,3	42,8	37,7	43,4	34,3	42,1	40,5	45,4	47,8	38,8	43,3	38,3	26,6	39,7
		5	30,5	43,5	39,5	40,9	40,2	37,5	38,7	43,3	46,6	37,3	41,3	36,8	29,3	37,8
6		34,3	34,2	34,3	35,5	28,4	30,8	34,7	34,7	37,1	33,3	33,9	32,9	27,3	31,8	
7		34,6	41,0	40,0	40,7	43,7	40,0	40,7	45,4	46,7	31,8	40,8	38,8	31,6	37,4	
8		28,7	39,4	36,9	36,0	36,8	35,1	36,0	41,3	46,4	30,4	38,0	35,6	25,5	31,8	
9		21,0	32,4	32,9	30,9	30,1	28,5	31,3	38,3	37,5	24,8	31,9	28,9	20,8	29,4	
10		19,5	27,2	30,9	21,3	27,2	22,8	26,5	31,3	30,0	22,4	26,3	23,8	16,3	23,9	
Сезоны 2015 г.	1	27,4	33,2	16,6	26,9	24,9	29,8	23,1	35,2	33,9	22,6	29,3	27,7	30,4	24,8	
	2	29,8	39,0	26,6	34,8	31,8	36,3	29,8	40,1	43,0	37,7	36,9	28,7	20,1	33,7	
	3	38,0	42,5	34,4	38,7	34,6	36,2	33,7	43,3	43,9	32,9	39,9	35,4	30,5	33,8	
	4	50,8	40,8	40,2	33,9	38,7	34,5	35,9	43,2	45,5	36,2	39,7	37,7	28,2	36,1	
	5	24,5	42,5	42,7	41,2	37,6	41,3	39,3	46,6	48,1	37,6	41,2	38,6	26,3	36,7	
	6	27,0	50,0	45,1	41,0	37,8	40,3	39,0	45,4	47,6	36,7	43,7	40,5	29,0	37,6	
	7	40,2	37,6	47,0	40,7	38,1	37,7	39,0	46,2	48,2	38,1	42,7	39,9	24,9	37,0	
	8	30,6	37,2	38,4	34,9	32,5	35,3	35,7	42,6	44,6	32,9	36,7	35,3	23,7	33,5	
	9	19,7	33,7	37,1	29,8	34,2	30,2	31,3	38,2	36,6	26,2	33,6	30,7	19,3	28,4	
	10	26,6	32,3	33,1	28,6	27,9	30,7	31,1	37,8	36,7	27,4	31,9	30,3	27,4	28,6	

Коэффициент парной корреляции между полуденными температурами приземной атмосферы, полученными на метеостанциях и полуденными температурами земной поверхности полученной при спутниковой съемке аппаратурой Landsat 7 и 8 практически равен 1, что свидетельствует о еще одном доказательстве достоверности дистанционного зондирования этого показателя природно-территориальных комплексов.

2.9. Выводы по второй главе

В второй главе приведено общее описание методики обработки и автоматизированного дешифрирования материалов ДЗ с целью геоинформационного картографирования ландшафтов. Освещена обобщенная структурная схема использования снимков Landsat для картографирования ландшафтов. Описана радиометрическая и атмосферная коррекция спутниковых данных. Приведены особенности предварительной обработки данных, получаемых со спутника Landsat 7. Было выполнено построение мозаики снимков картографируемой территории средствами ERDAS. Представлен расчет вегетационного индекса NDVI и температуры земной поверхности по данным Landsat 7 и 8. Было выполнено моделирование рельефа земной поверхности в границах провинции Хузестан. Приведен анализ сезонной динамики полей температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI.

На основании проведенных анализов и перечисленных выше элементов, можно заключить следующее:

1. Предложенная методика исследования позволяет решить задачу картографирования ландшафтов с использованием оригинальных алгоритмов расчета индекса *Iind*.

2. При оценке *Iind* требуется нормирование полуденных радиационных температур. Эффективность такого представления ТЗП выражается в четком различии типов элементарных поверхностей по углу падения склонов (рисунки 2.8, 2.10).

3. При оценочном картографировании элементарных морфологических единиц ландшафтов (элементарных поверхностей) полигональное моделирование рельефа с формализованным выделением типов (по показателям пригодности в сельскохозяйственном использовании земель) позволяет оценить

сезонную изменчивость частных показателей ТЗП °С и NDVI и увидеть их независимость друг от друга.

4. Геоинформационное картографирование ландшафтов с использованием методики автоматизированного дешифрирования материалов ДЗ обеспечивает представление оценочных карт территории по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

5. Методика формализованного деления исследуемой территории на типы элементарных поверхности может быть использована для для создания оценочных карт территории.

3. СОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ КАРТ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ЛАНДШАФТНЫХ РЕСУРСОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

3.1. Создание слоев картографической основы

Одним из трех слоев картографической основы является растровая копия топографической карты масштаба 1:200 000 (рисунок 3.1.) [5,56].

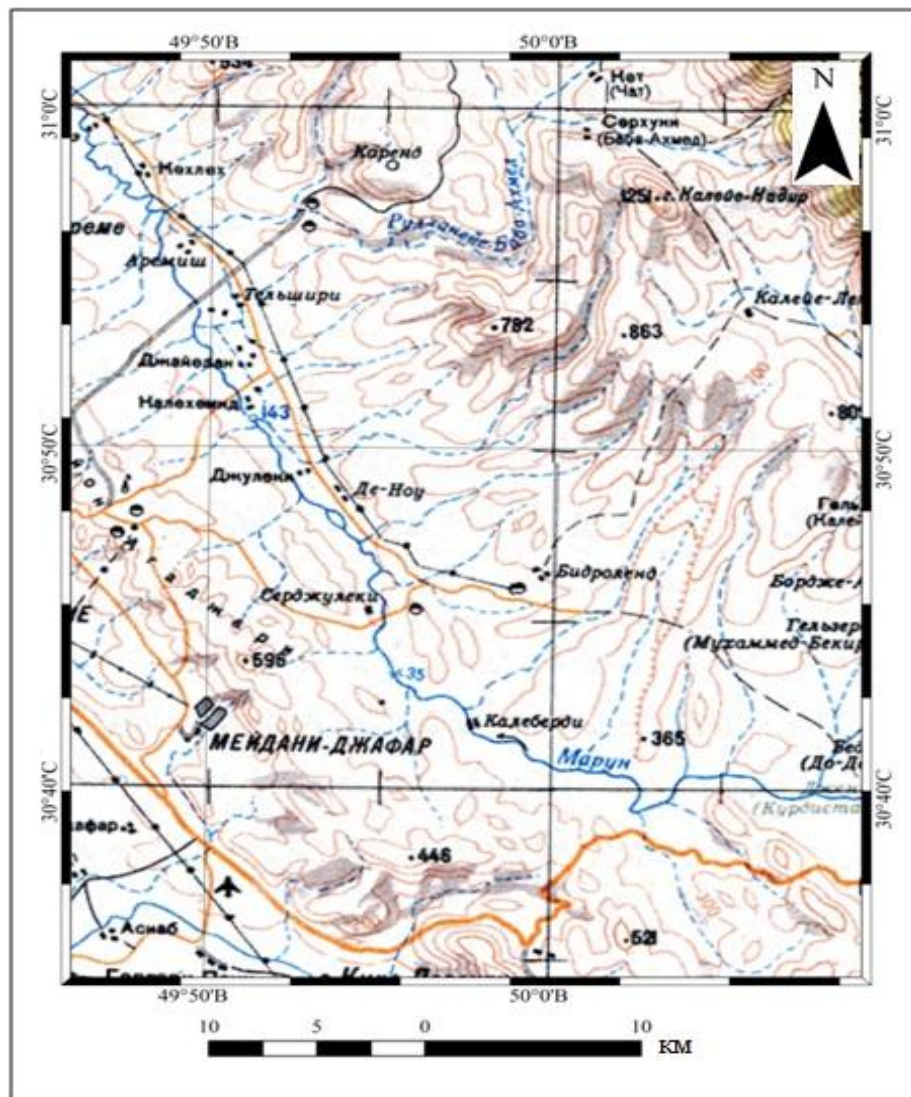


Рисунок 3.1 – Растровая копия слоя картографической основы. Фрагмент мозаики топографических карт.

Следующим слоем картографической основы служит мозаика материалов космической фотосъемки (рисунок 3.2) назначение которого состоит в актуализации топографического изображения [30,31]. Космические фотоснимки найдены на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



Рисунок 3.2 – Композиция слоев топографического изображения и космического фотоизображения фрагмента провинции Хузестан.

Третьим слоем картографической основы является полигональная модель рельефа. Данная модель служит основой для определения и отражения

интегрального показателя – индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов типов элементарных поверхностей (рисунок 3.3) [6,7]. Растр высотных отметок радиометра ASTER получен на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov/>. По данному растру были построены линейная и полигональная модель рельефа территории [84].

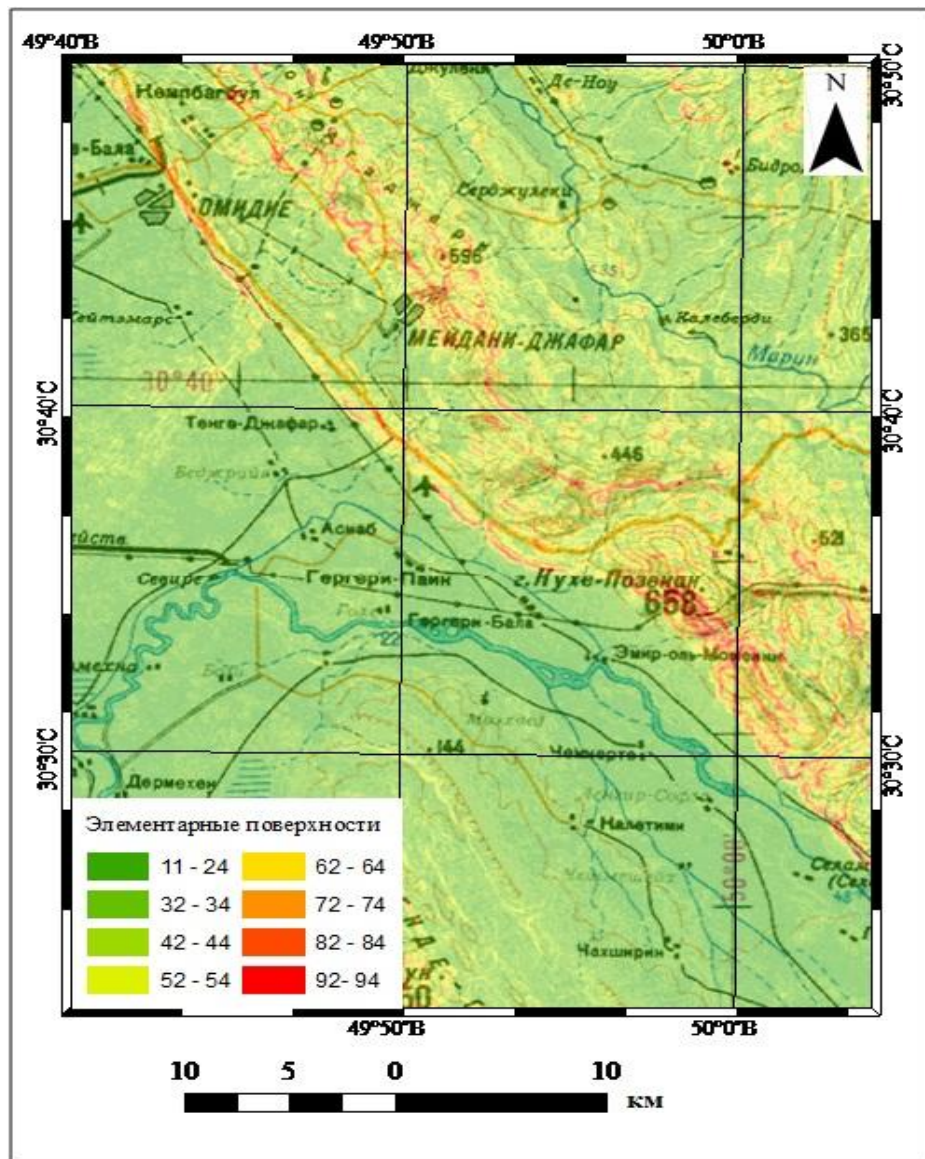


Рисунок 3.3 – Композиция слоев топографического изображения и полигональной модели рельефа.

3.2. Создание слоев специального содержания, отражающих данные спутникового зондирования

Данные слои строятся начиная со стандартной функции ArcGIS ArcToolbox → Инструменты Spatial Analyst → Зональные → Зональная статистика в таблицу. Условиями реализации функции «Зональная статистика в таблицу» являются наличие векторного слоя типов элементарных поверхностей 11 – 94, растры, содержащие значения полуденной температуры и вегетационного индекса NDVI [71,72]. Функция рассчитывает статистические характеристики, например, среднее арифметическое, с фиксированием в результирующей таблице. Далее полученная таблица копируется в Excel-таблицу, в которой вычисляются парная корреляция r , ошибка её вычисления m и отношение r/m , свидетельствующее о значимости r . Кроме того, производится построение графиков сезонной динамики ТЗП °С [69,129,143] и NDVI (рисунок 2.7, 2.8) [45,46,87,88].

Одним из критериев качества материалов спутникового зондирования является облачность. В настоящей работе предусмотрено оконтуривание облаков и вырезание таких полигонов из растра. Таким образом, при наличии облачности, функция «Зональная статистика в таблицу» осуществляется для территории, свободной от облаков, а критерием качества полученных данных становится представительность типов элементарных участков земной поверхности, отраженных в соответствующей Excel-таблице (таблицы 2.4, 2.5 и рисунки 3.4, 3.5) [28,33,101].

Примеры растровых представлений температуры земной поверхности ТЗП °С и вегетационного индекса NDVI представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

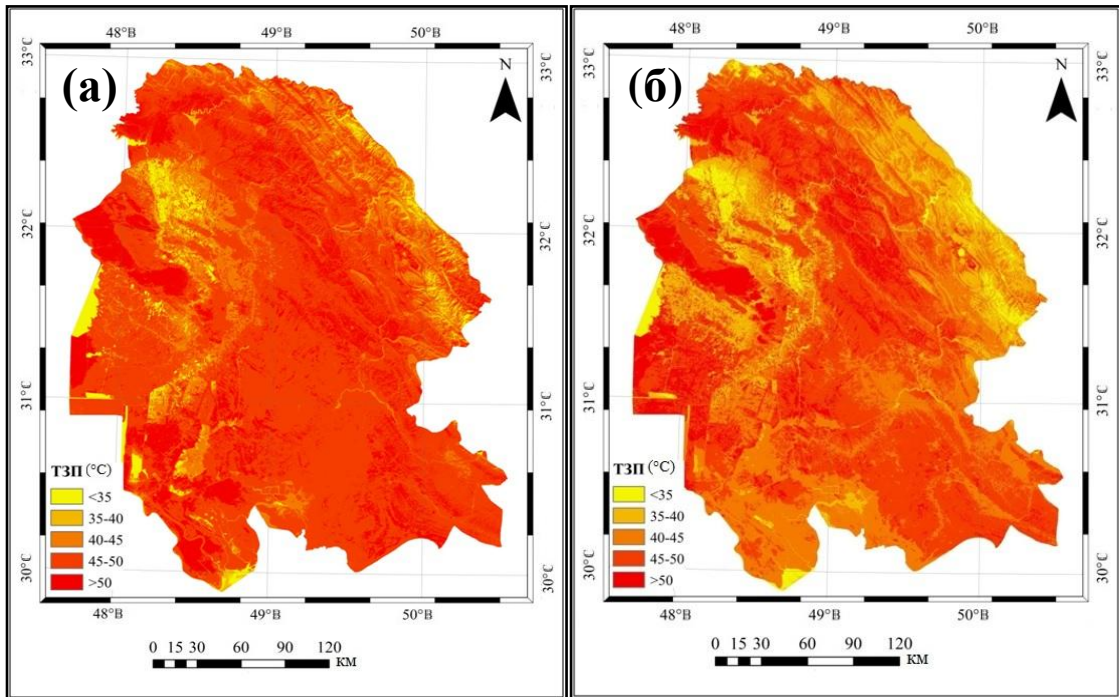


Рисунок 3.4 – Растры полуденных температур для сезонов 2011 г. Май (а), Сентябрь (б).

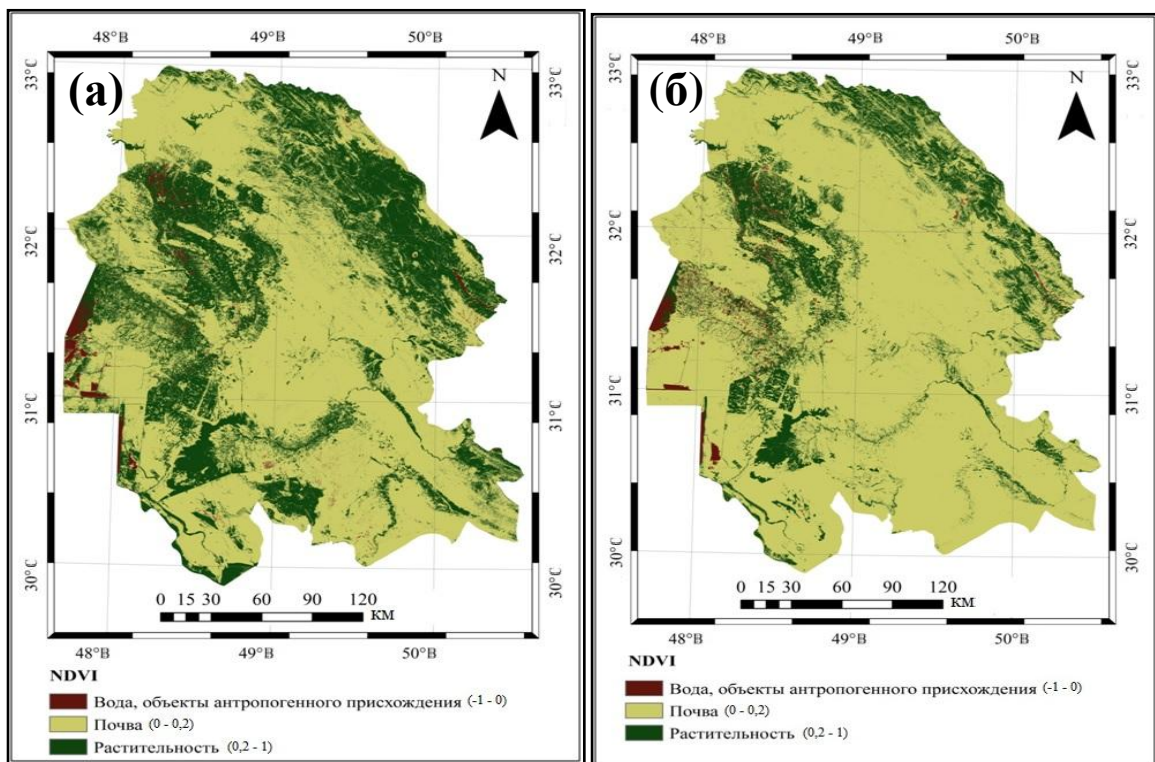


Рисунок 3.5 – Растры значений NDVI для сезонов 2011 г. Май (а), Сентябрь (б).

Примеры графического представления динамики ТЗП °С и NDVI, показаны ранее (рисунки 2.7 – 2.10).

Значения ТЗП °С и NDVI административных районов провинции Хузестан сведены в таблицы (таблицы 3.1, 3.2).

Таблица 3.1 – Сезонная динамика радиационной температуры в отдельных районах провинции Хузестан.

№	Район	Площадь		Температура 2011 г.									
		км ²	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Альваре Гармсири	2409,26	3,76	50,3	49,6	46,2	46,4	44,8	38,2	38,3	38,6	35,1	35,1
2	Сардашт	3840,99	5,99	49,7	49,3	44,3	45,8	42,8	37,6	35,3	36,0	33,1	33,3
3	Эндимешк	674,75	1,05	49,9	50,9	48,5	48,4	46,2	38,3	35,9	27,8	29,1	26,8
4	Андика	2368,03	3,71	47,9	47,9	42,8	43,9	41,2	37,2	34,1	33,8	31,4	31,7
5	Лали	757,26	1,18	48,6	48,6	43,9	44,7	43,0	37,7	35,7	35,7	33,9	33,9
6	Шуш	1753,65	2,73	48,0	50,9	47,9	46,6	41,8	36,7	28,6	19,1	23,0	16,4
7	Дизфуль	462,27	0,72	46,6	48,6	42,8	44,4	33,4	32,5	20,3	8,1	12,6	7,0
8	Лали	645,80	1,09	50,5	50,5	48,5	48,5	46,4	41,1	38,9	38,9	36,2	36,2
9	Гетвенд	1338,60	2,09	49,6	49,6	44,6	44,6	42,8	38,8	35,4	35,8	33,7	33,9
10	Изе	2511,85	3,92	47,3	47,4	42,2	42,2	39,0	35,5	33,4	33,2	30,4	30,4
11	Чогамиш	290,07	0,45	48,0	48,8	43,2	44,5	37,6	34,5	26,5	25,4	23,0	23,4
12	Масджед-Солейман	2172,70	3,39	51,0	51,0	49,1	49,1	46,5	41,7	39,6	39,6	36,4	36,4
13	Шавур	1722,07	2,69	48,8	49,5	45,4	43,9	32,9	31,9	25,2	22,9	23,7	23,5
14	Бостан	1283,69	2,01	50,9	51,6	44,9	42,4	40,6	35,7	34,4	34,3	33,6	31,7
15	Шушгер	2064,62	3,22	48,9	48,9	42,9	42,9	42,5	38,3	35,7	35,8	33,5	33,6
16	Дехдез	1281,18	2,01	46,5	47,6	40,6	37,8	31,7	33,5	32,7	28,4	26,2	26,5
17	Сусенгерд	840,24	1,31	49,3	49,4	45,9	43,4	33,1	32,7	31,9	28,7	28,2	25,3
18	Ахваз	6239,49	9,68	50,0	49,3	45,3	45,3	41,6	39,5	38,1	37,6	34,2	34,0
19	Хамидиех	830,52	1,31	49,6	49,8	46,2	44,9	39,5	37,8	36,8	33,9	32,1	31,3
20	Хафтгель	1435,03	2,24	50,8	50,8	48,3	48,3	45,9	42,1	40,7	40,7	37,3	37,3

21	Багмалек	1806,57	2,82	48,6	48,7	46,1	46,0	43,4	39,2	37,8	37,7	34,7	34,7
22	Бави	1173,28	1,83	50,2	50,2	46,0	46,0	46,1	41,4	38,5	38,5	36,0	36,0
23	Ховейзех	2751,80	4,31	50,3	47,1	14,6	17,7	15,3	13,4	11,1	11,0	6,2	7,2
24	Сейдун	453,78	0,71	47,3	48,3	43,2	42,4	37,1	33,7	34,9	32,6	30,1	30,7
25	Рамхормоз	2170,51	3,39	49,4	49,4	46,6	46,7	44,4	40,8	40,3	40,2	36,1	36,2
26	Рамшир	1318,01	2,06	49,7	49,7	46,8	46,8	44,9	40,2	39,9	39,9	35,8	35,8
27	Джайзан	963,18	1,51	49,5	49,5	47,2	47,4	45,8	41,8	40,5	39,8	35,1	36,3
28	Хорремшехр	2274,28	3,55	50,3	49,1	38,5	38,1	37,8	34,8	23,8	24,5	23,4	24,0
29	Шадеган	3595,29	5,61	49,6	49,6	47,8	47,7	44,7	40,8	37,7	37,7	35,2	35,2
30	Бендер-Махшехр	1460,39	2,28	50,2	50,2	47,4	47,3	44,2	41,2	39,4	39,4	36,2	36,2
31	Бехбехан	1883,73	2,94	49,4	49,4	47,1	47,4	45,8	42,2	40,1	39,3	34,7	35,3
32	Омидийех	1319,79	2,06	50,4	50,4	47,5	47,5	45,6	41,2	40,0	40,1	35,6	36,8
33	Агаджари	157,29	0,25	50,0	50,0	48,0	48,1	46,6	42,1	40,0	40,3	34,9	37,4
34	Бендер-Имам Хомейни	449,65	0,71	48,6	48,6	44,3	44,1	41,0	39,5	36,6	36,6	34,0	34,0
35	Чам-Халаф Иса	1176,92	1,84	50,4	50,4	47,3	47,4	44,2	40,6	39,7	39,9	35,8	36,4
36	Абадан	1610,03	2,51	48,7	48,7	46,7	46,6	44,3	40,3	37,5	37,5	35,0	35,0
37	Зейдун	966,12	1,51	50,1	50,1	47,7	47,6	46,0	41,8	39,6	39,3	35,3	36,3
38	Хендиджан	2607,03	4,07	49,9	49,9	42,8	46,1	44,4	39,8	38,1	39,0	35,1	36,4
39	Мину	36,49	0,04	48,8	48,1	42,1	41,4	41,1	37,0	31,7	32,7	30,3	30,9
40	Арванд-Кенар	934,89	1,45	49,0	49,0	46,6	46,5	45,8	41,0	40,1	40,1	36,6	36,6
	Σ	64031,10	100										

Таблица 3.2 – Сезонная динамика вегетационного индекса в отдельных районах провинции Хузестан.

№	Район	NDVI 2011 г.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Альваре Гармсири	0,140	0,097	0,091	0,107	0,120	0,130	0,129	0,140	0,143	0,143

2	Сардашт	0,166	0,137	0,136	0,127	0,135	0,147	0,147	0,173	0,188	0,189
3	Эндимешк	0,223	0,089	0,082	0,089	0,104	0,077	0,130	0,184	0,242	0,226
4	Андика	0,185	0,185	0,179	0,172	0,169	0,177	0,177	0,179	0,193	0,192
5	Лали	0,166	0,166	0,161	0,151	0,141	0,156	0,155	0,169	0,186	0,185
6	Шуш	0,299	0,143	0,131	0,071	0,104	0,063	0,146	0,202	0,250	0,234
7	Дизфуль	0,428	0,288	0,274	0,197	0,172	0,151	0,205	0,263	0,288	0,303
8	Лали	0,129	0,129	0,123	0,123	0,122	0,124	0,122	0,122	0,131	0,132
9	Гетвенд	0,183	0,184	0,169	0,170	0,184	0,195	0,185	0,185	0,206	0,205
10	Изе	0,185	0,185	0,173	0,174	0,173	0,177	0,179	0,178	0,187	0,188
11	Чогамиш	0,279	0,223	0,201	0,164	0,184	0,237	0,241	0,266	0,324	0,314
12	Масджед-Сoleyман	0,117	0,117	0,112	0,112	0,110	0,113	0,112	0,112	0,121	0,121
13	Шавур	0,220	0,158	0,150	0,148	0,161	0,199	0,210	0,213	0,242	0,219
14	Бостан	0,152	0,158	0,147	0,154	0,141	0,130	0,124	0,109	0,095	0,118
15	Шуштер	0,160	0,159	0,158	0,158	0,183	0,202	0,190	0,190	0,198	0,197
16	Дехдез	0,189	0,166	0,154	0,161	0,174	0,165	0,165	0,167	0,180	0,186
17	Сусенгерд	0,164	0,144	0,134	0,140	0,076	0,084	0,124	0,113	0,125	0,105
18	Ахвaz	0,144	0,141	0,135	0,138	0,140	0,154	0,150	0,149	0,162	0,159
19	Хамидиех	0,192	0,161	0,151	0,156	0,140	0,169	0,171	0,155	0,168	0,169
20	Хафтгель	0,112	0,112	0,106	0,106	0,105	0,108	0,107	0,108	0,116	0,116
21	Багмалек	0,142	0,140	0,136	0,136	0,132	0,141	0,143	0,144	0,150	0,150
22	Бави	0,125	0,125	0,121	0,121	0,124	0,136	0,130	0,130	0,142	0,142
23	Ховейзех	0,109	0,136	0,130	0,133	0,130	0,138	0,109	0,090	0,054	0,096
24	Сейдун	0,153	0,140	0,146	0,144	0,145	0,155	0,162	0,168	0,181	0,180
25	Рамхормоз	0,130	0,130	0,121	0,122	0,122	0,126	0,128	0,128	0,136	0,136
26	Рамшир	0,123	0,123	0,113	0,113	0,119	0,122	0,122	0,122	0,131	0,131
27	Джайзан	0,117	0,117	0,110	0,113	0,112	0,119	0,118	0,118	0,124	0,129
28	Хорремшехр	0,141	0,116	0,116	0,119	0,151	0,134	0,137	0,146	0,151	0,138
29	Шадеган	0,163	0,163	0,146	0,146	0,149	0,158	0,164	0,164	0,175	0,175
30	Бендер-Махшехр	0,138	0,138	0,131	0,131	0,130	0,138	0,137	0,137	0,146	0,146
31	Бехбехан	0,134	0,134	0,122	0,125	0,127	0,137	0,134	0,132	0,131	0,145
32	Омидийех	0,118	0,118	0,110	0,112	0,113	0,119	0,118	0,119	0,126	0,130

33	Агаджари	0,108	0,108	0,104	0,108	0,109	0,115	0,109	0,111	0,112	0,120
34	Бендер-Имам Хомейни	0,138	0,138	0,130	0,130	0,136	0,144	0,150	0,150	0,160	0,160
35	Чам-Халаф Иса	0,120	0,120	0,112	0,113	0,115	0,122	0,120	0,121	0,128	0,129
36	Абадан	0,141	0,141	0,133	0,132	0,132	0,141	0,140	0,141	0,149	0,149
37	Зейдун	0,129	0,129	0,117	0,122	0,124	0,129	0,125	0,124	0,126	0,141
38	Хендиджан	0,110	0,110	0,103	0,107	0,108	0,114	0,112	0,113	0,122	0,125
39	Мину	0,232	0,223	0,185	0,148	0,205	0,209	0,230	0,244	0,269	0,250
40	Арванд-Кенар	0,138	0,138	0,140	0,140	0,137	0,144	0,138	0,138	0,146	0,146

3.3. Создание слоя специального содержания, отражающего данные полевых наблюдений

Полевые работы выполнены с целью верификации построения полей радиационной температуры по 94 пробным площадкам с фиксацией: даты наблюдений; азимута фотографирования (цифровым фотоаппаратом SONY DSC-W830); географической широты и долготы (портативным GPS устройством); характера поверхности и вида землепользования; ТЗП °С, измеренной радиометром SMT160 и ТЗП °С, полученной по данным со спутника Landsat 8. Коэффициент парной корреляции r между полуденными температурами, полученными радиометром SMT160 и аппаратурой спутника Landsat 8 равен 0,997, ошибка m вычисления r составляет 0,066, отношение r/m равно 15,129, что свидетельствует о практически полном совпадении двух рядов данных.

Результаты фотофиксации элементарных поверхностей, координирования точек и фиксирования азимута направления фотографирования, температурные измерения земной поверхности сведены в таблице 2.6. Для построения слоя хранения полевых изысканий создана персональная база геоданных в которой помещен точечный класс пространственных объектов. Далее точки наблюдений занесены по координатам, атрибутивная таблица расширена полями для указания идентификатора, азимута фотографирования и вставки растрового

изображения. В завершении работы в произведено указание адресов хранения фотографий (рисунок 3.6) [38,39].

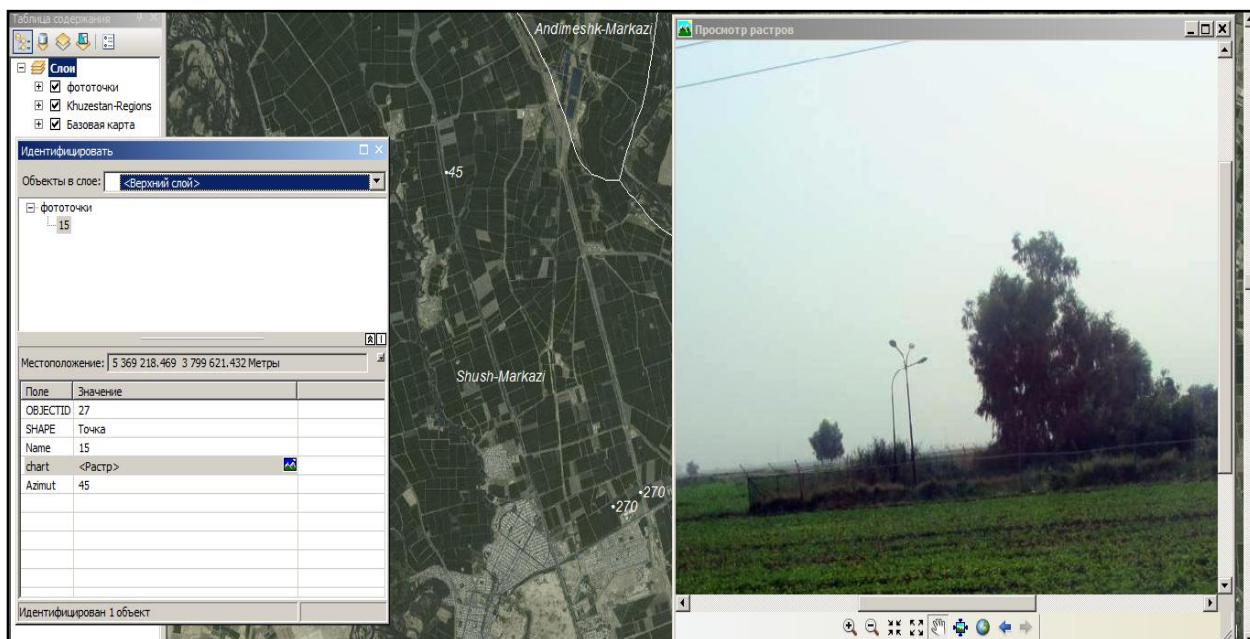


Рисунок 3.6 – Слой, отражающий полевые изыскания. Границы административных районов, космическое фотоизображение в масштабе 1:100 000. Точка полевых наблюдений № 15. Азимут фотографирования 45°. Наземная фотография.

3.4. Создание слоев элементов специального содержания, отражающих результирующие многокритериальные показатели

3.4.1. Формализованная классификация элементарных поверхностей по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Как указывалось ранее, интегральный индикатор состояния природно-ландшафтных ресурсов вычисляется как средневзвешенная сумма 10 значений нормированной температуры земной поверхности и 10 значений NDVI (таблица 1.3).

Методика расчета интегральных показателей предполагает оценку сходства результатов классификации, полученных по данным отдельных лет и оценку сходства типов элементарных поверхностей, выделенных по данным за весь период мониторинга. Так по расчетам *Iind* за период 2011 – 2016 гг. при критической вероятности 0,05% данные, полученные в 2013 году, отличаются от данных, полученных в другие годы с превышением критического значения 2,2898. В этой связи типизация элементарных участков земной поверхности выполнялась по температурным характеристикам и параметрам вегетационного индекса, зафиксированных в 2011, 2012, 2014, 2015 и 2016 годах (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Типы элементарных поверхностей, ранжированных по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Уровень <i>Iind</i>	Номер типа	<i>Iind</i>	Тип	Уровень <i>Iind</i>	Номер типа	<i>Iind</i>	Тип
I	23	1,067	92	IV	16	0,219	64
	20	0,946	82		11	0,198	52
	24	0,929	93		12	0,158	53
II	21	0,741	83	V	5	0,098	32
	17	0,660	72		13	0,094	54
	25	0,588	94		6	0,089	33
	18	0,529	73	VI	7	0,070	34
	22	0,509	84		8	0,050	42
1	0,466	11	9		0,024	43	
III	14	0,418	62	10	0,000	44	
	4	0,404	24				
	3	0,398	23				
	2	0,392	22				
	19	0,353	74				
	15	0,337	63				

Графическое представление $Iind$ отражено на рисунке 3.7. Следует заметить, что больших различий в параметрах потенциала природно-ландшафтных ресурсов при переходе от типа к типу элементарных поверхностей не наблюдается. Тем не менее, некоторые колебания в поведении графика обнаруживаются. Картографическое представление интегрального индикатора состояния природно-ландшафтных ресурсов природно-территориальных комплексов показано на рисунке 3.8 [8,9].

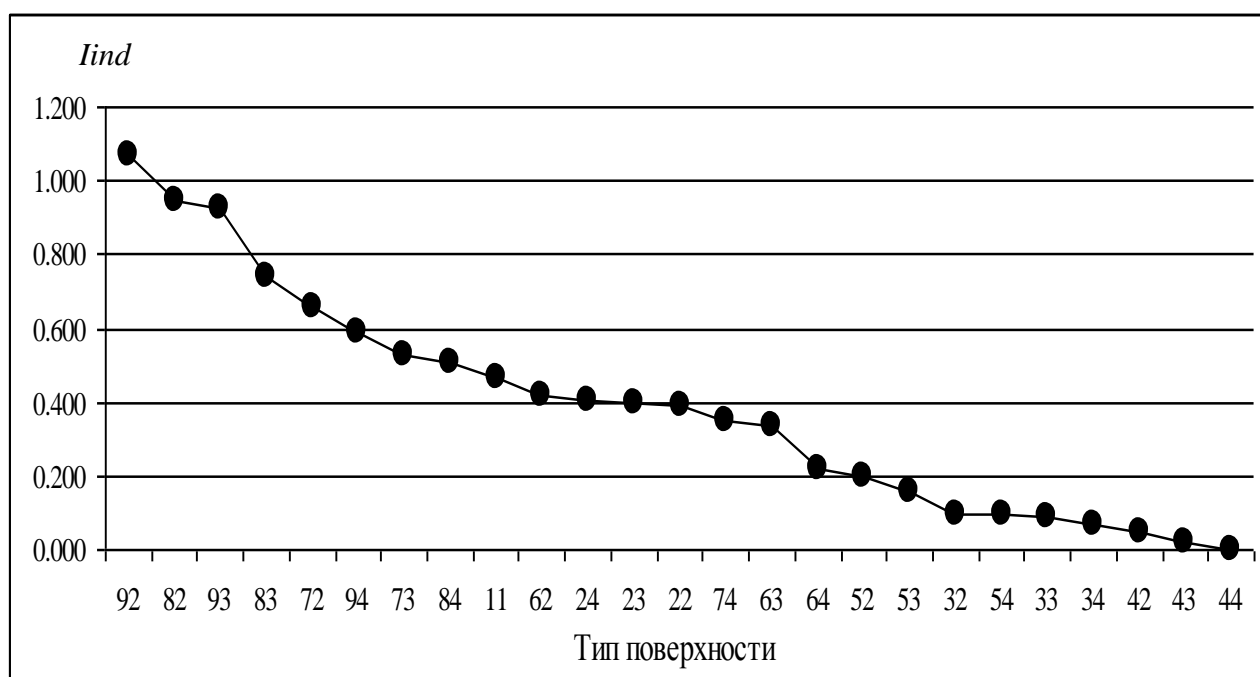


Рисунок 3.7 – Ранжирование типов элементарных поверхностей 11 – 94 по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

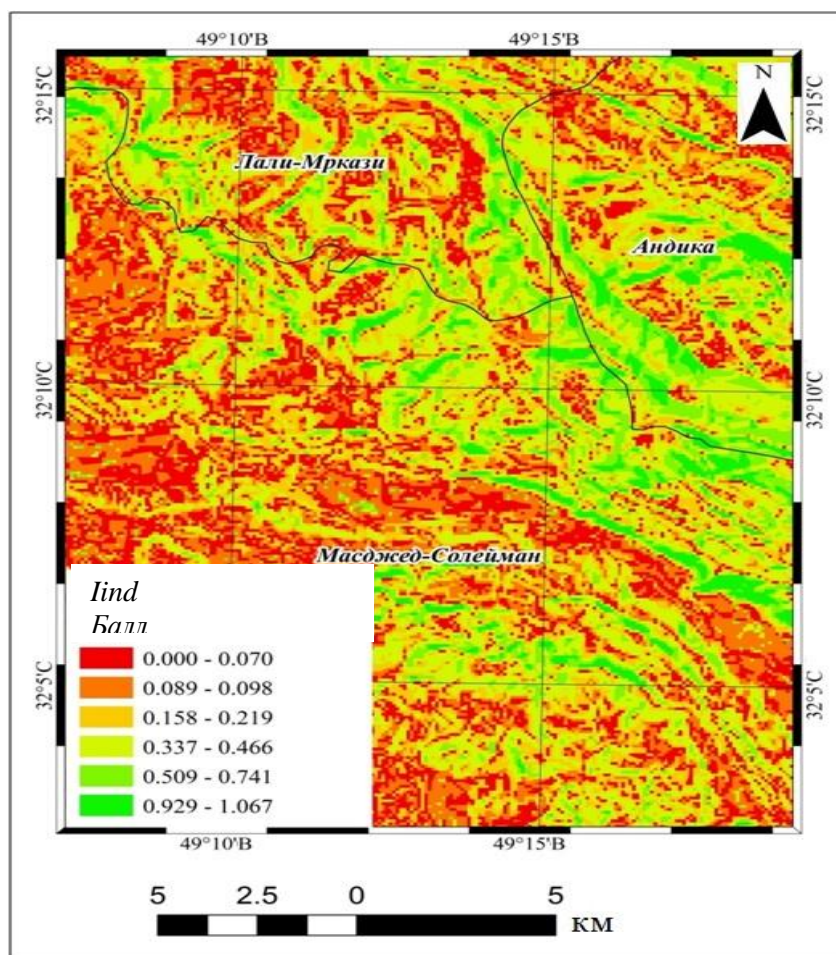


Рисунок 3.8 – Фрагмент карты *Iind* типов элементарных поверхностей.

3.4.2. Формализованная классификация единиц административного деления провинции Хузестан по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Решение данной классификационной задачи, как и предыдущей начинается с реализации функции «Зональная статистика в таблицу». При этом в качестве зон указывается файл районов провинции Хузестан. Потенциал природно-ландшафтных ресурсов административных районов показан в таблице 3.4 [67].

Таблица 3.4 – Типы административных районов провинции Хузестан, ранжированных по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

Уровень <i>Iind</i>	Район	<i>Iind</i>	Уровень <i>Iind</i>	Район	<i>Iind</i>
I	Изе	1,4684	IV	Сусенгерд	0,4350
	Дизфуль	1,3523		Бендер-Имам	0,4270
	Мину	1,2262		Ховейзех	0,3936
	Дехдез	1,0997		Абадан	0,3820
	Шавур	1,0436		Альваре	0,3707
	Андика	1,0147		Арванд-Кенар	0,3606
	Чогамиш	0,9921		Бостан	0,3424
II	Гетвенд	0,8993	V	Бехбехан	0,3208
	Сейдун	0,8748		Лали	0,2880
	Лали-Мркази	0,8400		Зейдун	0,2304
	Шуштер	0,8281		Бави	0,2134
	Сардашт	0,7872		Рамхормоз	0,1960
	Хорремшехр	0,7613		Бендер-Махшехр	0,1950
III	Шуш	0,6349	VI	Хендиджан	0,1718
	Хамидиех	0,6080		Джайзан	0,1647
	Эндимешк	0,5513		Масджед-Солейман	0,1335
	Шадеган	0,5505		Рамшир	0,1257
	Ахваз	0,5320		Чам-Халаф	0,1168
				Омидийех	0,1126
				Агаджари	0,0898
			VII	Хафтгель	0,0000

График рангов административных районов отражен на рисунке 3.9. Фрагмент карты представлен на рисунке 3.10 [11].

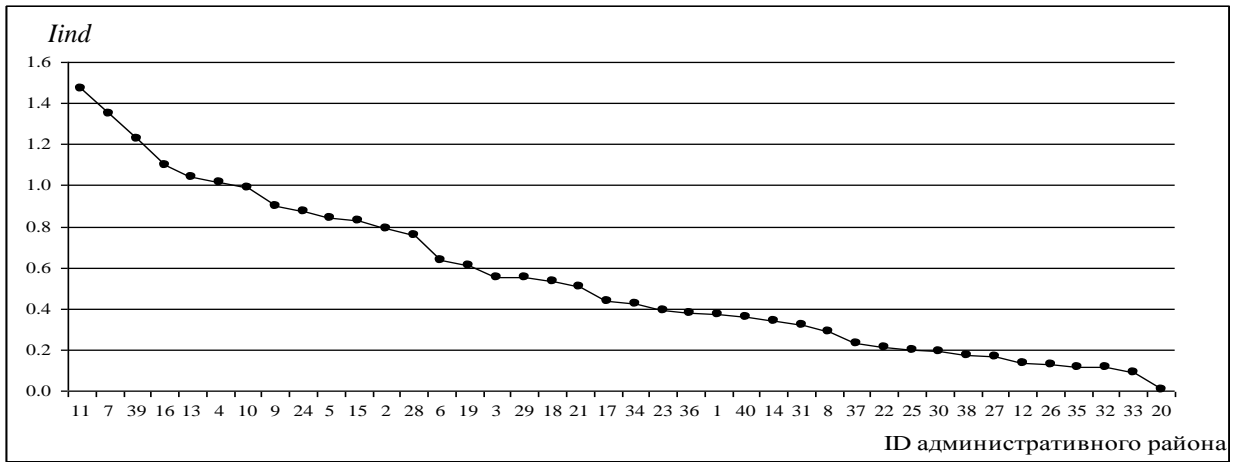


Рисунок 3.9 – Ранжирование административных районов по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

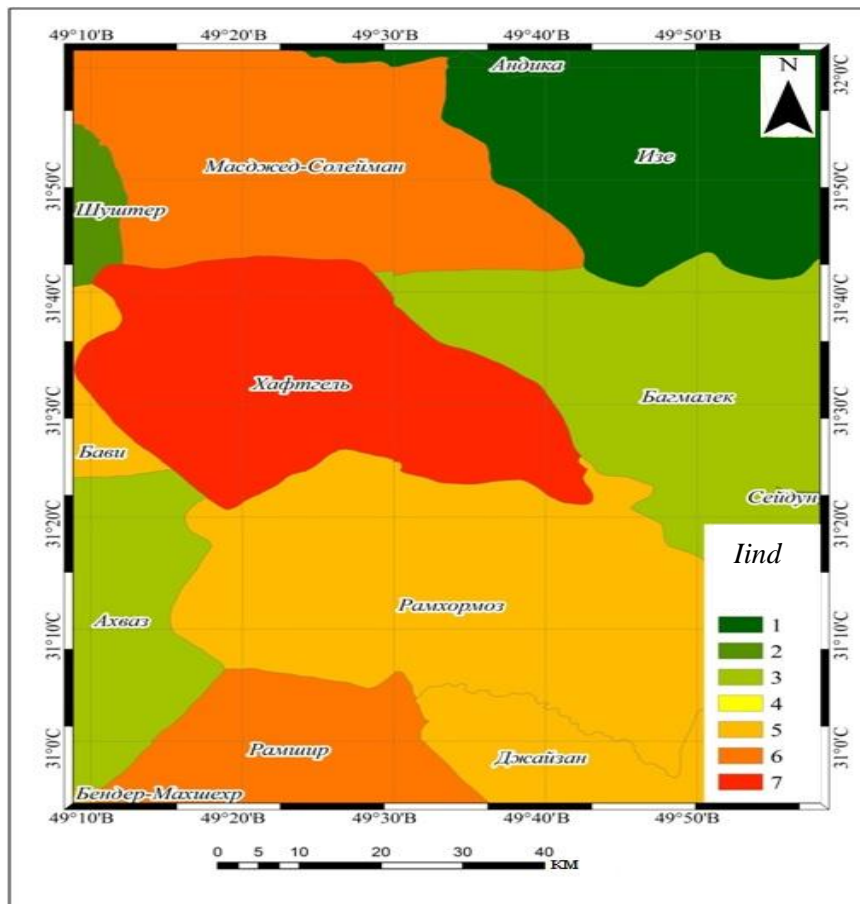


Рисунок 3.10 – Фрагмент карты *Iind* административных районов провинции Хузестан.

3.4.3. Оценка распространенности территорий, различных видов землепользования природно-ландшафтных ресурсов.

В отличие от типов элементарных поверхностей (преимущественно элементарных морфологических единиц ландшафтов), формализовано выделяемых по диапазонам значений экспозиции и угла падения склона, и в отличие от административных единиц провинции Хузестан, выделяемых по картографическим материалам, имеющим законодательное обоснование границ, территории определенных видов землепользования природно-ландшафтных ресурсов определяются в результате автоматизированного дешифрирования, задавая следующие характеристики эталонам (краткие и развернутые):

1. Населенные пункты (селитебные территории и промышленные зоны);
2. Водоемы (реки, озера, водохранилища);
3. Пустоши (пустынные равнинные и склоновые поверхности, покрытие песками, супесями, суглинками с щебнистыми и крупнокаменистыми включениями, а также такыры, солонцы и солончаки);
4. Болота;
5. Леса (лесные массивы, сформированные естественным образом);
6. Сады (пальмовые финиковые плантации, виноградники и сады цитрусовые, черешневые, персиковые, фисташковые, яблоневые, грушевые и др.);
7. Рисовые плантации;
8. Пашни (земли культивирования пропашных агрокультур);
9. Пастбища (луговые растительные сообщества разнотравные, травянокустарничковые растительные сообщества с редианами кустарниковых видов).

Исходными данными для выделения указанных территорий послужили материалы космической съемки аппаратами Landsat 7 и 8 по сезонам с мая по сентябрь за период 2011-2016 гг.

Обработка данных ДЗЗ требует оценки достоверности дешифрирования объектов картографирования. Для этого определяется несколько эталонов для определенного класса объектов на космическом изображении – территории определенных видов землепользования. Одним из критериев достоверности дешифрирования служит отношение правильно распознанных объектов к числу объектов определенного класса. Другим критерием служит сопоставление соответствующих площадей. Причём как в пределах отдельных классов, так и в пределах всей мозаики [60].

При оценке достоверности автоматизированного дешифрирования используется матрица в ячейках которой указывается количество распознанных объектов соответствующих эталону заданного класса и количество распознанных объектов соответствующих эталону другого класса. То есть, количество объектов классифицированных иначе. По ячейкам диагонали матрицы задается число объектов задаваемого класса пользователем программы, по ячейкам наддиагональным и поддиагональным отражаются количества объектов так или иначе распознанные программой (отнесенные к другому классу). В итоговой строке и итоговой колонке приводятся отношения числа объектов задаваемого класса пользователем к общему числу объектов, включая и те, которые программа отнесла к другому классу [60]. Пример такой матрицы приведен в таблице 3.7.

Функция автоматизированного дешифрирования (в ArcGIS по данным, полученным космическими аппаратами Landsat 7 и 8) используется для оценки распространенности территорий, различных видов землепользования природно-ландшафтных ресурсов в принципе может быть выполнена один раз. Тогда такое деление территорий картографирования требует верификации полевыми наблюдениями. Альтернативным способом верификации служит многократное повторение автоматизированного дешифрирования ДДЗЗ и сопоставление результатов. Так в целях повышения достоверности выделения территорий

определенных видов землепользования автоматизированное дешифрирование проведено по периодам съемки в мае и сентябре в течение 2011 – 2016 гг.

Методика автоматизированного дешифрирования включает создание точечного шейп-файла, набор соответствующих эталонов точечной локализации для заданных классов территорий, конвертирование шейп-файла в файл сигнатур (пункт меню «Create signature»). После чего производится распознавание и классификация территорий подобным эталонам по методу максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Classification), используя материалы космической съемки по каналам RGB и файл сигнатур.

Достаточно распространенным способом оценки достоверности результатов автоматизированного дешифрирования является расчет коэффициента Каппа K и общей точности для вычисления, которых необходимо построить соответствующую матрицу [129,130]. Общая точность (измеритель качества автоматизированного дешифрирования) является отношением суммы значений диагональных ячеек (общее число эталонов) к общему значению от дешифрированных объектов (как правильно, так не правильно распознанных) (таблица 3.6).

Данные показатели указывают на точность классифицированных изображений территорий определенных видов землепользования в провинции Хузестан.

Коэффициент Каппа вычисляется по следующей формуле [75,120]:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}, \quad (3.1.)$$

где: N – общее число дешифрируемых объектов; r - количество строк (колонок) в квадратной матрице; $\sum_{i=1}^r x_{ii}$ – сумма значений диагональных элементов (количества эталонов определенных классов); $\sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})$ – сумма произведений значений первых ячеек итоговой строки и итоговой колонки (таблица 3.7),

вторых ячеек итоговой строки и итоговой колонки, третьих ячеек итоговой строки и итоговой колонки и т.д.

В случае примера, для которого приведена таблица 3.7., общая достоверность классификации соответствует вероятности, равной 97%. Значение коэффициента Каппа варьируется в пределах 0,96–0,99 для правильно распознанных территорий в соответствии с заданным эталоном.

Таблица 3.5 – Значение коэффициента Каппа.

Период съемки	<i>K</i>	Период съемки	<i>K</i>
май 2011	0,96	май 2014	0,98
сентябрь 2011	0,99	сентябрь 2014	0,97
май 2012	0,97	май 2015	0,98
сентябрь 2012	0,99	сентябрь 2015	0,97
май 2013	0,97	май 2016	0,98
сентябрь 2013	0,97	сентябрь 206	0,98

Таблица 3.6 – Значение общей точности.

Период съемки	Общая точность	Период съемки	Общая точность
май 2011	0,97	май 2014	0,98
сентябрь 2011	0,99	сентябрь 2014	0,98
май 2012	0,98	май 2015	0,98
сентябрь 2012	0,99	сентябрь 2015	0,98
май 2013	0,98	май 2016	0,99
сентябрь 2013	0,98	сентябрь 206	0,98

Полученные данные по достоверности дешифрирования свидетельствуют о достаточно репрезентативном представлении территорий указанных видов землепользования (использования природно-ландшафтных ресурсов).

Результаты дешифрирования оформляются в табличной (таблица 3.7) и картографической формах (рисунок 3. 11).

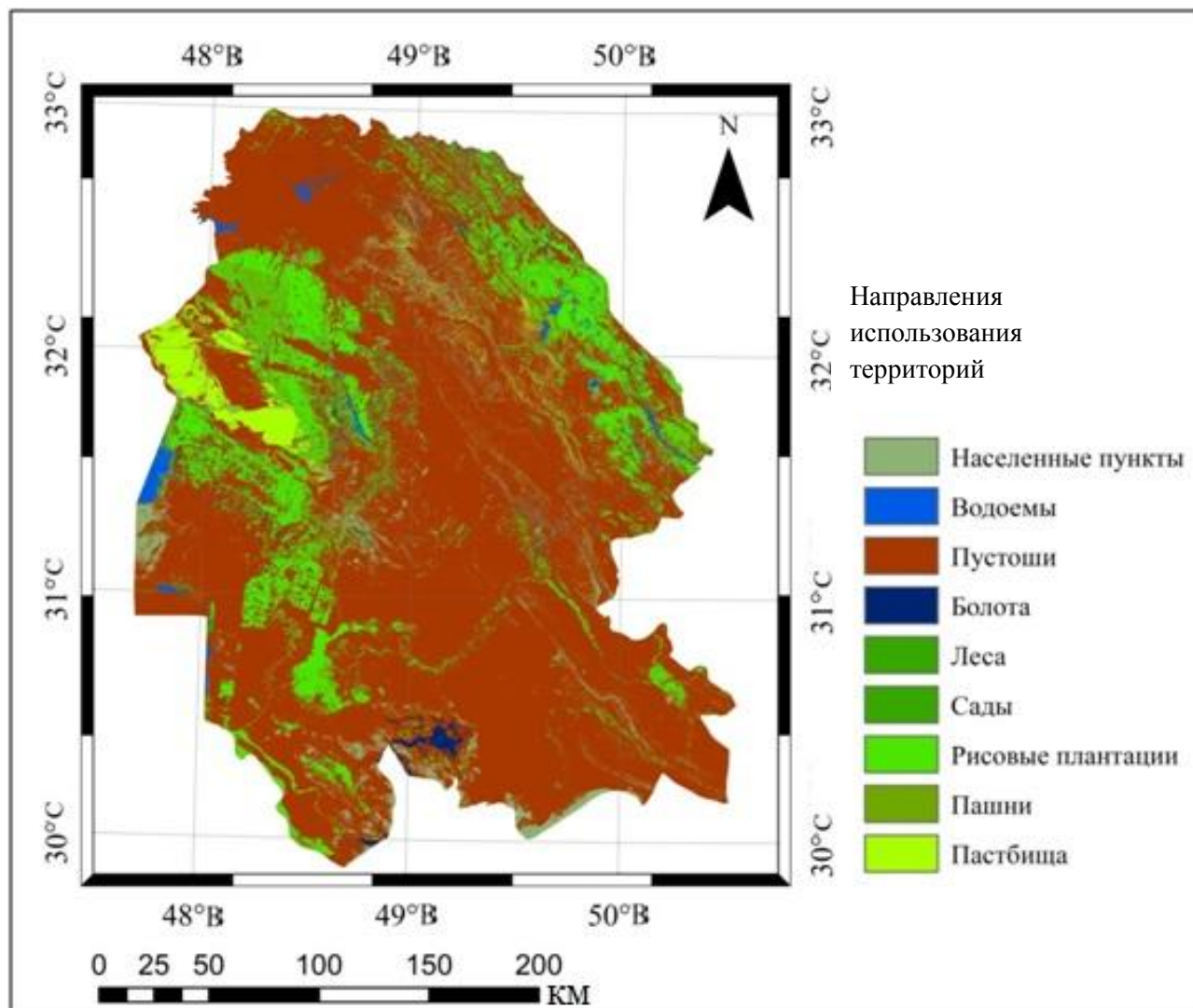


Рисунок 3.11 – Классификация территорий определенных видов землепользования провинции Хузестан.

Таблица 3.7 – Количество эталонных территорий (пикселей), классифицированных пользователем (N) и количество территорий (M), распознанных программой по методу максимального правдоподобия по данным съемки КА Landsat 7. Май 2011 г.

Матрица ошибок, используемая для оценки точности классификации территорий по данным съемки КА Landsat 7. Май 2011 г		Вид землепользования										Пикселей, соответствующих классификационному признаку, %
		1. Нас. Пункты	2. Водоемы	3. Пустоши (пустыни)	4. Болота	5. Территории, занятые лесными массивами	6. Виноградники и сады	7. Рисовые плантации	8. Земли культивирования пропашных агрокультур	9. Луговые растительные сообщества	Всего пикселей, указанных пользователем	
Вид землепользования	1. Нас. Пункты	<u>(29)</u>	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	30	$((29/30) \times 100 = 96,7$
	2. Водоемы	(0)	<u>(125)</u>	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	125	$((125/125) \times 100 = 100,0$
	3. Пустоши (пустыни)	(2)	(7)	<u>(98)</u>	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	107	$((98/107) \times 100 = 91,6$
	4. Болота	(0)	(0)	(1)	<u>(45)</u>	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	47	$((45/47) \times 100 = 95,7$
	5. Территории, занятые лесными массивами	(0)	(2)	(0)	(0)	<u>(37)</u>	(1)	(0)	(0)	(0)	40	$((37/40) \times 100 = 92,5$
	6. Виноградники и сады	(0)	(0)	(0)	(2)	(0)	<u>(41)</u>	(0)	(0)	(0)	43	$((41/43) \times 100 = 95,3$
	7. Рисовые плантации	(1)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)	<u>(67)</u>	(0)	(0)	69	$((67/69) \times 100 = 97,1$
	8. Земли культивирования пропашных агрокультур	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<u>(102)</u>	(0)	102	$((102/102) \times 100 = 100,0$
	9. Луговые растительные сообщества	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	(1)	(1)	(0)	<u>(75)</u>	78	$((75/78) \times 100 = 96,2$
	Всего пикселей	(32)	(134)	(102)	(47)	(37)	(43)	(69)	(102)	(75)	<u>(619)</u>	-
	Пикселей, соответствующих классификационному признаку, %	$((29/32) \times 100 = 90,6$	$((125/134) \times 100 = 93,3$	$((98/102) \times 100 = 96,1$	$((45/47) \times 100 = 95,7$	$((37/37) \times 100 = 100,0$	$((41/43) \times 100 = 95,3$	$((67/69) \times 100 = 97,1$	$((102/102) \times 100 = 100,0$	$((75/75) \times 100 = 100,0$	-	-

Далее для выделенных, таким образом, территорий произведены расчеты и картографическое представление интегральной характеристики *Iind* (рисунок 3.12).

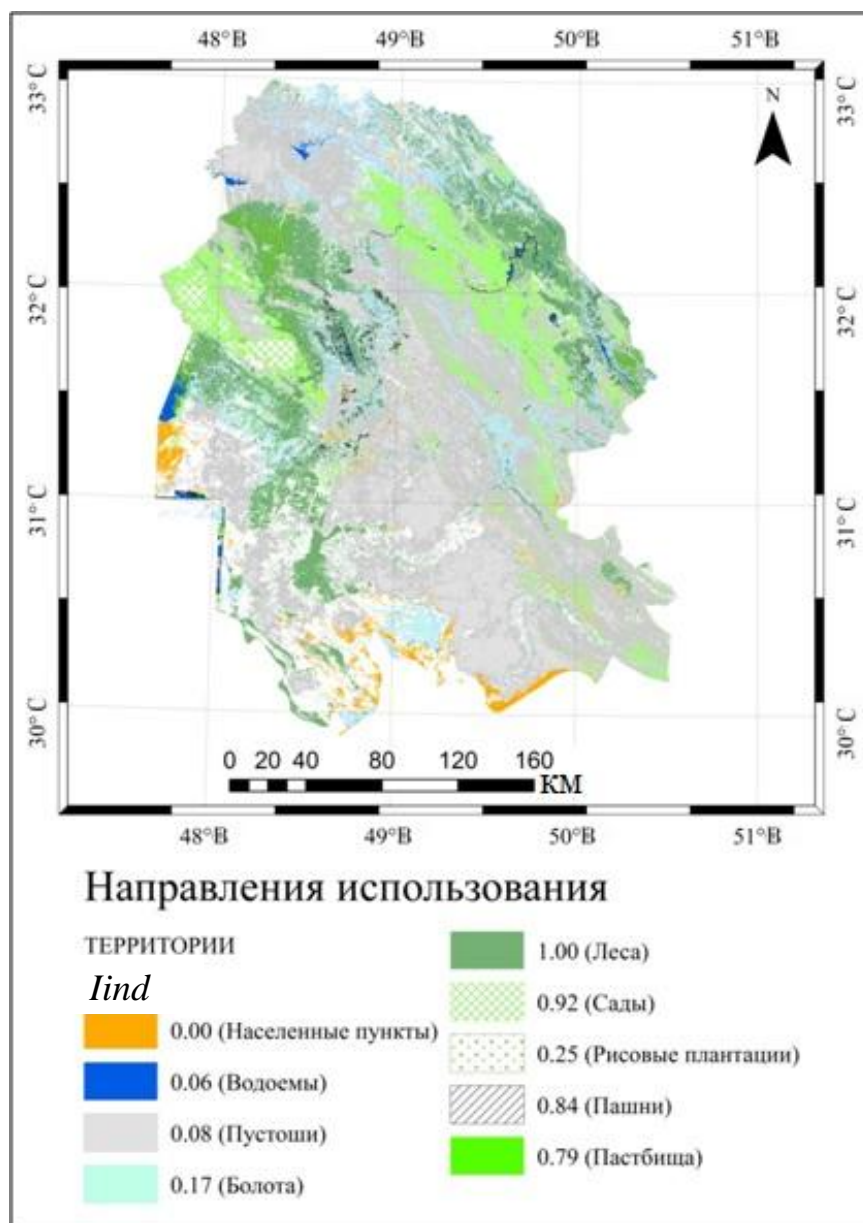


Рисунок 3.12 – Интегральный индикатор состояния природно-ландшафтных ресурсов территорий определенных видов землепользования провинции Хузестан.

3.5. Методические положения оценочного геоинформационного картографирования ресурсного потенциала природно-территориальных комплексов по данным спутниковой съемки сезонной динамики радиационной температуры и вегетативного индекса NDVI

В основе оценочного картографирования положен многовариантный расчет интегрального показателя и его представление некоторой средневзвешенной балльной величиной в программе «Признак». Для осуществления вычислительных процедур в программе «Признак» задается список объектов картографирования и список признаков, по которым производится сопоставление обозначенных объектов одним из трех способов [42,124].

Первый способ сопоставления предусматривает использование числовых значений, пересчитываемых по ряду функций: прямолинейной, логарифмической, экспоненциальной, по квадратным и кубическим сплайн-функциям.

Второй способ сопоставления типов объектов картографирования заключается в заполнении элементов матрицы выраженности конкретного признака у соответствующей пары объектов по принципу «больше – одинаково – меньше» с указанием кратности превосходства максимального значения над минимальным.

Третий способ сопоставления объектов картографирования заключается в заполнении элементов матрицы выраженности конкретного признака (или ряда признаков) у соответствующей пары объектов значением балла превосходства. При таком сопоставлении объектов картографирования необходимо предварительно построить таблицу сценариев соответствия балла превосходства сочетанию прямых и косвенных показателей. Количество баллов

превосходства – величина, определяемая пользователем программы, и может задаваться разными диапазонами значений [66].

При третьем способе сопоставления объектов картографирования элементы матрицы выраженности конкретного признака у соответствующей пары объектов заполняются баллами, минимальный диапазон значений которых составляет от 1/3 до 3, максимальный диапазон значений от 1/9 до 9. После заполнения матрицы вычисляется её максимальное собственное значение L_{\max} и индекс согласованности $ИС = (L_{\max} - n) / (n - 1)$, где n – число сравниваемых элементов. Далее рассчитывается отношение согласованности ОС делением индекса согласованности заполненной матрицы на такой же индекс, получаемый для матрицы, элементы которой заполнены случайным образом. Согласованность считается нормальной, в случае если ОС не превышает 10%.

Функций, реализуемых варианты первого способа сопоставления объектов картографирования имеют 5 наиболее широко используемых шкал:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Экспонента: } Y = A \times e^{(B \times X)}; \\ \text{Логарифм: } Y = A \times \text{Log}_B X; \\ \text{Кубический сплайн: } Y = A \times (X-N)^3 + B \times (X-N)^2 + C \times (X-N) + D \\ \text{Квадратный сплайн: } Y = A \times (X-N)^2 + B \times (X-N) + C; \\ \text{Линейная функция: } Y = AX + B; \end{array} \right\} (3.2)$$

где: Y – искомая функция, X – известный параметр, A, B, C и D – различные вводимые коэффициенты, N – балл максимального либо минимального параметра.

Приведенные формулы преобразуют элементарные функции так, чтобы шкалы рассчитывались на основании естественного интервала значений аргумента и задаваемом пользователем балльном интервале конечного показателя. То есть балльные шкалы в отличие от исходных функций имеют не один аргумент, а пять: непосредственно измеренный параметр, максимально и минимально возможные значения измеренного параметра, максимальное и

минимальное значения баллов [12,13].

Сплайновые, экспоненциальная и логарифмическая функции применяются при описании объектов картографирования, при составлении различных оценочных карт широкого тематического ряда. Особое положение занимает линейная шкала. Она используется в случаях, когда измеренный показатель нормируется предварительно, например, средствами Excel-таблиц, или при обозначении значимости признаков, что было сделано в данной работе [19,47].

В формуле экспоненциальной шкалы коэффициенты А и В вычисляются по формулам, выведенным с учётом следующей системы:

$$\begin{cases} Y_{MAX} = A \times e^{B \times X_{MAX}} \\ Y_{MIN} = A \times e^{B \times X_{MIN}} \end{cases} \quad (3.3.)$$

где Y_{MIN} – минимальный балл, Y_{MAX} – максимальный балл, X_{MIN} – минимальный измеряемый параметр, X_{MAX} – максимальный измеряемый параметр. Получаем формулы:

$$B = \frac{\ln Y_{MAX} - \ln Y_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (3.4.)$$

$$A = \frac{Y_{MAX} + Y_{MIN}}{e^{B \times X_{MAX}} + e^{B \times X_{MIN}}} \quad (3.5.)$$

Затем А и В подставляются в исходную формулу, и значения шкалы рассчитываются с учётом этих новых коэффициентов.

Для логарифмической шкалы система выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} Y_{MAX} = A \times \ln_B X_{MAX} \\ Y_{MIN} = A \times \ln_B X_{MIN} \end{cases} \quad (3.6.)$$

$$B = \left(\frac{X_{MAX}}{X_{MIN}} \right)^{\frac{1}{Y_{MAX} - Y_{MIN}}} \quad (3.7.)$$

$$A = \frac{X_{MAX}}{B^{Y_{MIN}}} \quad (3.8.)$$

Для кубического сплайна, исходная формула:

$$Y = A \times (X - N)^3 + B \times (X - N)^2 + C \times (X - N) + D \quad (3.9.)$$

преобразуется к виду:

$$Y = A \times (X - X_{max})^3 + B \times (X - X_{max})^2 + C \times (X - X_{max}) + D \quad (3.10.)$$

где: $D = Y_{max}$ при $X = X_{max}$

Так как производная равна нулю в начале и конце кривой то:

$$Y' = 3 \times A \times (X - X_{MAX})^2 + 2 \times B \times (X - X_{MAX}) + C = 0 \quad (3.11.)$$

откуда $C = 0$ при $X = X_{MAX}$, но C – константа,

и $3 \times A \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2 + 2 \times B \times (X_{MIN} - X_{MAX}) = 0$, откуда:

$$A = \frac{-2 \times B}{3 \times (X_{MIN} - X_{MAX})} \quad (3.12.)$$

В свою очередь:

$$\begin{aligned} Y_{MIN} &= A \times (X_{MIN} - X_{MAX})^3 + B \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2 + Y_{MAX} = \\ &= \frac{-2 \times B \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2}{3} + B \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2 + Y_{MAX} = \\ &= Y_{MAX} + \frac{B \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2}{3} \end{aligned} \quad (3.13.)$$

откуда

$$B = \frac{3 \times (Y_{MIN} - Y_{MAX})}{(X_{MIN} - X_{MAX})^2} \quad (3.14.)$$

В итоге получается:

$$Y = A \times (X - X_{MAX})^3 + B \times (X - X_{MAX})^2 + Y_{MAX} \quad (3.15.)$$

$$A = \frac{-2 \times B}{3 \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2} \quad (3.16.)$$

$$B = \frac{3 \times (Y_{MIN} - Y_{MAX})}{(X_{MIN} - X_{MAX})^2} \quad (3.17.)$$

Для квадратного сплайна:

$$Y = A \times (X - N)^2 + B \times (X - N) + C \quad (3.18.)$$

Данное выражение преобразуется:

$$Y = A \times (X - X_{MAX})^2 + B \times (X - X_{MAX}) + C \quad (3.19.)$$

$C = Y_{MAX}$ при $X = X_{MAX}$ и производная равна нулю в конце кривой:

$$Y' = 2 \times A \times (X - X_{MAX}) + B = 0 \quad (3.20.)$$

откуда $B = 0$ при $X = X_{MAX}$

$$Y_{MIN} = A \times (X_{MIN} - X_{MAX})^2 + Y_{MAX} \quad (3.21.)$$

откуда
$$A = \frac{Y_{MIN} - Y_{MAX}}{(X_{MIN} - X_{MAX})^2} \quad (3.22.)$$

Или:
$$Y = A \times (C - C_{MIN})^2 + B \times (C - C_{MIN}) + C \quad (3.23.)$$

$C = Y_{MIN}$ при $X = X_{MIN}$ и производная равна нулю в начале кривой:

$$Y' = 2 \times A \times (X - X_{MIN}) + B = 0 \quad (3.24.)$$

откуда $B = 0$ при $X = X_{MIN}$

$$Y_{MAX} = A \times (X_{MAX} - X_{MIN})^2 + Y_{MIN} \quad (3.25.)$$

откуда
$$A = \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{(X_{MAX} - X_{MIN})^2} \quad (3.26.)$$

В итоге получаются два варианта:

$$1) Y = A \times (X - X_{MAX})^2 + Y_{MAX} \quad (3.27.)$$

$$A = \frac{Y_{MIN} - Y_{MAX}}{(X_{MIN} - X_{MAX})^2} \quad (3.28.)$$

$$2) Y = A \times (X - X_{MIN})^2 + Y_{MIN} \quad (3.29.)$$

$$A = \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{(X_{MAX} - X_{MIN})^2} \quad (3.30.)$$

К особой относится составная функция, описанная в разделе 1.4.

В заключение с помощью программы «Признак» выполняется дисперсионный анализ, назначение которого, в нашем случае, определить степень сходства сезонной изменчивости интегрального показателя *Iind* в

разные годы и степень сходства сезонной изменчивости интегрального показателя, рассчитанного для типов элементарных поверхностей (рисунок 3.13), административных районов (рисунок 3.14), а также для территорий определенных видов землепользования (рисунок 3.12). Как показал анализ, выполненный для элементарных поверхностей, 2012 год оказался отличным от других лет мониторинга с превышением критического значения при критической вероятности равной 5%.

Для расчета интегрального индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов по естественным территориальным образованиям (типам элементарных поверхностей) требуется полигональное моделирование рельефа (таблица 2.3) с выделением типов, отражающих требования к сельхозугодьям. Далее создается система таблиц, сезонной изменчивости значений вегетационного индекса NDVI и полуденной нормированной радиационной температуры земной поверхности ТЗП °С. Затем на основании параметров сезонной изменчивости NDVI и ТЗП °С в программе «Признак» для типов элементарных поверхностей рассчитывается *Iind* при сценариях, которыми являются отдельные годы спутниковой съемки. Сценарии, отличающиеся на величину, превышающую критическое значение, исключаются из расчета многокритериального показателя. На заключительном этапе типы элементарных поверхностей, характеризующиеся *Iind*, отражаются на соответствующей карте.

Проверка определения полуденной температуры земной поверхности спутниковым радиометром должна производиться сравнением ДДЗЗ с наземными наблюдениями, как на метеостанциях, так и при полевых изысканиях.

Объектами другого варианта оценочного картографирования служат административные районы провинции. Следует заметить, что изменчивость *Iind* для административных районов не превзошла критических значений при

критической вероятности, равной 5% за все годы дистанционного зондирования земной поверхности [18,26,27].

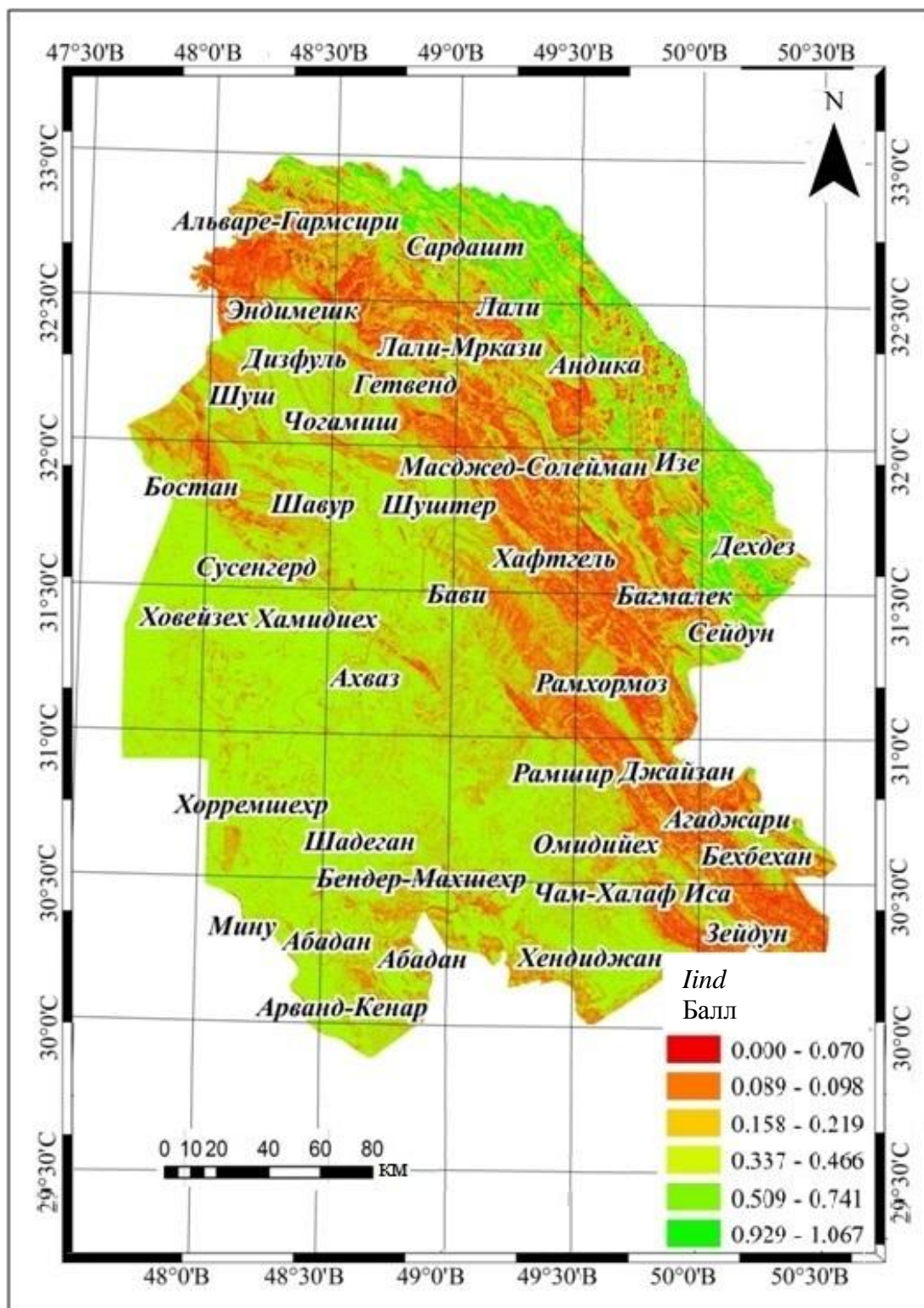


Рисунок 3.13 – Уровни значений *Ind* элементарных поверхностей (таблица 3.3) провинции Хузестан.

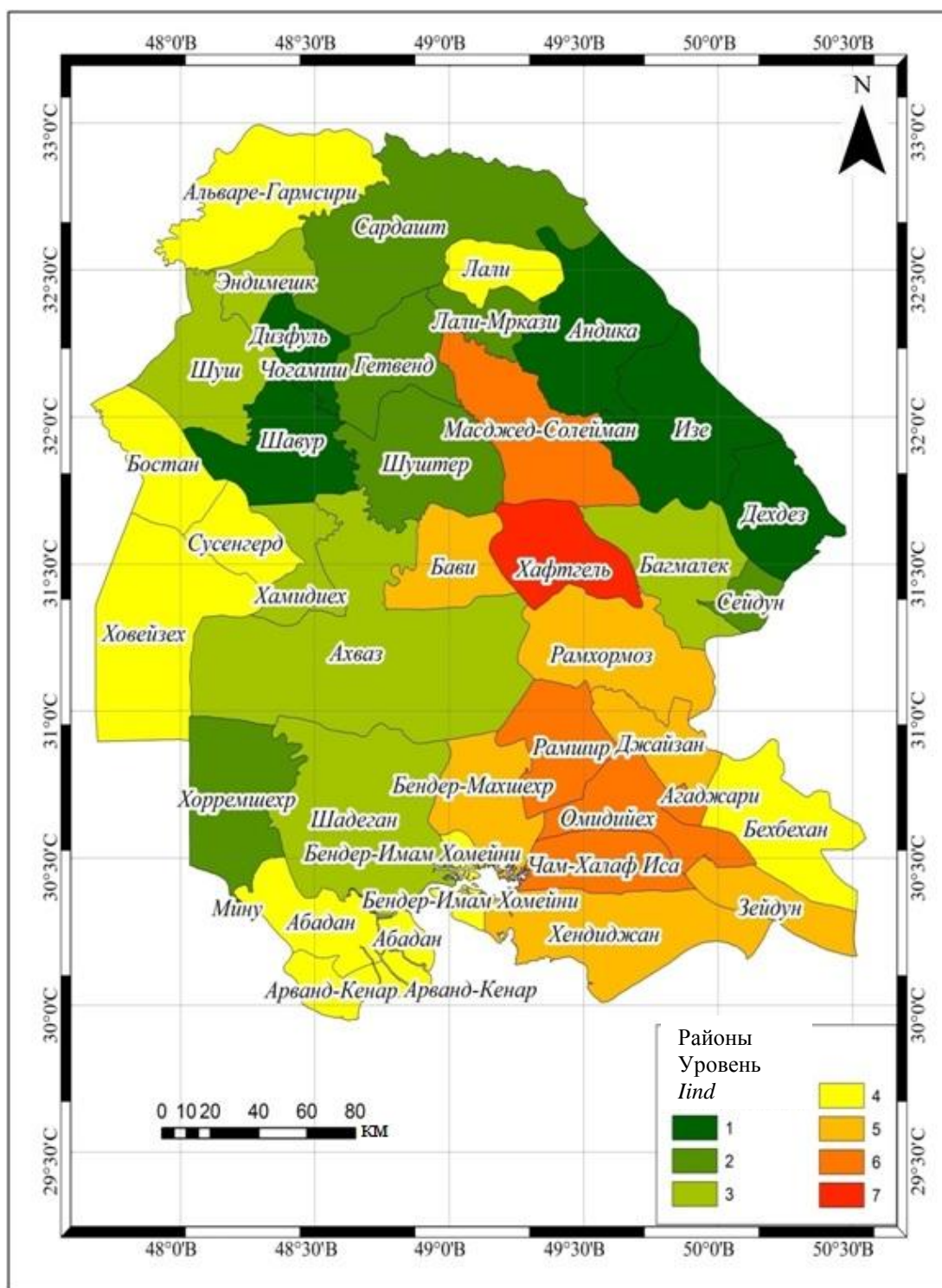


Рисунок 3.14 – Уровни значений *Iind* административных районов (таблица 3.4) провинции Хузестан.

3.6. Рекомендации по картографическому обеспечению спутникового мониторинга условий сельскохозяйственного использования территорий

С точки зрения получения тематических оценочных карт (картографическое обеспечение) наиболее эффективны процедуры классификации, которые обеспечивают необходимые изображения территории. Мониторинг условий сельскохозяйственного использования территорий обеспечивается используемыми в данной работе геоинформационными картографическими методами (см. Главы 2 и 3).

В соответствии с требованиями к исходным данным, на основании которых вычисляются многокритериальные оценочные характеристики объектов сравнительного анализа должно быть не менее 3-х, признаков сравнения должно быть не менее 3-ех, сценариев сравнения должно быть тоже не менее 3-ех. Таким образом, количество лет мониторинга (сценариев) должно быть как минимум 3, причем они не должны отличаться по показателю *Iind* на величину большую критического значения. Сравнительная оценка сценариев производится дисперсионным анализом, с использованием критериев Шеффе, реализуемым в программе «Признак». Очевидно, что чем больше количество лет охвачено базой геоданных, тем выше репрезентативность оценивания объектов картографирования.

Наряду с элементами специального содержания NDVI и ТЗП °С административных районов и элементарных поверхностей, фиксируемых с 16 дневным интервалом в течение теплого периода времени года, создаются слои топографической основы. К данным слоям относятся мозаика растровых копий топографических карт и мозаика космических снимков, полученных по каналам RGB. Данные материалы спутниковой съемки предназначены для обновления топографических изображений и для автоматизированного дешифрирования территорий населенных пунктов, болот, сельскохозяйственных земель и других природно-территориальных образований (по пункту меню в ArcGIS

«Классификация по методу максимального правдоподобия» (Maximum Likelihood Classification). В связи с чем сроки получения данных фотоматериалов должны соответствовать периоду межени, а время прошедшее с момента съемки не должно превышать одного года. Такое требование обусловлено большой строительной активностью в провинциях Ирана.

3.7. Выводы по третьей главе

В третьей главе приведены результаты составления оценочных карт состояния природно-ландшафтных ресурсов по данным космических съёмок, при обработке материалов космического зондирования земной поверхности с помощью вышеописанных алгоритмо.

1. Созданы слои картографической основы, специального содержания, отражающих данные спутникового зондирования и слои элементов специального содержания, отражающих результирующие многокритериальные показатели.

2. Показано картографические представление радиационной температуры и вегетативного индекса NDVI.

2. Выполнены расчеты интегрального показателя *Iind*, формализованная классификация и оценочное картографирование элементарных поверхностей, территорий различных видов землепользования и единиц административного деления провинции Хузестан по интегральному индикатору состояния природно-ландшафтных ресурсов.

3. Описана оценка распространенности территорий, различных видов землепользования природно-ландшафтных ресурсов.

4. Представлены методические положения оценочного геоинформационного картографирования ресурсного потенциала природно-территориальных комплексов по данным спутниковой съемки сезонной динамики радиационной температуры и вегетативного индекса NDVI, и

рекомендации по картографическому обеспечению спутникового мониторинга условий сельскохозяйственного использования территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы выполнены теоретическое обоснование и практическая реализация методики оценочного картографирования состояния природно-ландшафтных ресурсов по данным спутниковой съемки радиационной полуденной температуры земной поверхности и пространственного распределения значений вегетационного индекса NDVI.

Предложены методика обработки данных спутникового зондирования с целью вычисления значений индекса *I_{ind}*, позволяющего выполнить процедуры параметризации типов элементарных поверхностей с оценкой их представительности. Приведены примеры созданных автором слоев картографической основы и слоев специального содержания оценочных карт.

Основные методические положения предложенного оценочного картографирования заключаются:

- в формализованном делении территории картографирования на типы элементарных поверхностей, соответствующие требованиям сельхозугодий, параметризуемые сезонной изменчивостью значений вегетационного индекса NDVI и полуденной температуры земной поверхности ТЗП;
- в расчете интегрального индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов и решении классификационной задачи выделенных элементарных поверхностей;
- в расчете интегрального индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов и решении классификационной задачи административных районов провинции Хузестан;

– в расчете интегрального индекса состояния природно-ландшафтных ресурсов и решении классификационной задачи территорий различных видов землепользования.

Основные выводы по решению задач создания базы метео данных и производства полевых изысканий в целях проверки репрезентативности обработки результатов космического зондирования земной поверхности:

– коэффициент парной корреляции r между полуденными температурами, полученными радиометром SMT160 и аппаратурой спутника Landsat 8 равен 0,997, ошибка m вычисления r составляет 0,066, отношение r/m равно 15,129, что свидетельствует о практически полном совпадении двух рядов данных.

– коэффициент парной корреляции между полуденными температурами земной поверхности, полученными на метеостанциях и по спутниковой съемке аппаратурой космических аппаратов Landsat 7 и 8 практически равен 1, что свидетельствует о достоверности определения этого показателя природно-территориальных комплексов по данным дистанционного зондирования.

Основные результаты исследования, которые могут быть использованы при решении задач организации и картографического сопровождения спутникового мониторинга контроля качества природопользования:

– методика автоматизированного дешифрирования разновременных материалов спутникового зондирования природно-ландшафтных ресурсов в среде ГИС, для геоинформационное картографирование ландшафтов.

– методика формализованного деления исследуемой территории на типы элементарных поверхностей (в соответствии с требованиями к сельхозугодьям), для параметризации данных типов сезонной изменчивостью значений вегетационного индекса NDVI и радиационной температуры земной поверхности.

– накопление временных рядов индексов NDVI и ТЗП по статистически представительному количеству сезонов теплого периода года, что проверяется расчетами в программе «Признак»;

– представление территории функциональными типами, отличающимися по ресурсному потенциалу – интегральной характеристикой, включающей главным образом показатели сельскохозяйственного использования земель, и представление соответствующей оценочной карты интегральных характеристик, которые отражают эффективность эксплуатации природно-ландшафтных ресурсов в целом. Такая природно-ресурсная информация позволяет составлять схемы территориального планирования, предусматривающие инженерное обустройство землевладений в границах, как отдельных сельских муниципальных образований, так и в пределах отдельных хозяйствующих субъектов – природно-хозяйственных систем.

Кроме того, другие оценочные карты могут представлять, например, долевое участие в интегральном показателе угодий пастбищного животноводства, пахотных площадей выращивания зерновых агрокультур, фруктовых плантаций и т.д.

– ГИС сопровождение мониторинга природопользования выражается в создании базы геоданных, отражающей сезонную динамику NDVI и ТЗП, а также позволяющей рассчитывать интегральные показатели ресурсного потенциала и решать различные классификационные задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абушенко Н.А., Алтынцев Д.А., Мазуров А.А., Минько Н.П.* Оценка площадей крупных лесных пожаров по данным AVHRR/NOAA // Исследования Земли из космоса, 2000. – №2. – С. 87-93.
2. *Авере Джечи, Афанасьев В.А., Васильев П.С., Паниди Е.А., Щербаков В.М.* Методика и вычислительные средства экспертно-оценочного картографирования результатов комплексной оценки городских почв // Сб. статей “Теория и практика эколого-географических исследований” под ред. В.В.Дмитриева и др. СПб, ТИН, 2005. – С. 571-591.
3. *Балдина Е.А., Грищенко М.Ю.* Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вестник Московского университета, 2014. – Серия 5. – География. – № 3. С. 35-42.
4. *Берлянт А. М.* Картография: учебник для вузов – М.: Аспект Пресс, 2001. – 336 С.
5. *Берлянт А.М.* Картографический метод исследования природных явлений, практическое пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 76 С.
6. *Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 252 С.
7. *Берлянт А.М.* Картография. – М.: Аспект пресс, 2002. – 336 С.
8. *Берлянт А.М.* О сущности картографической информации // Изв. ВГО, 1978. – № 6. – С.490-497.
9. *Берлянт А.М.* Тилло и развитие методов использования карт // Изв. ВГО, 1982. – т. 114. – вып. 6. – С. 554-558.
10. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса, 2011. – №3. – С. 3-13.
11. *Бугаевский Л. М.* Математическая картография. – М.: Изд. Златоуст, 1998. – 400 С.

12. *Вахрамеева Л.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л.* Математическая картография. – М.: Изд. Недра, 1986. – 288 С.
13. *Викторов А.С.* Рисунок ландшафта. – М.: Мысль, 1986. – 179 С.
14. *Горный В.И., Крицук С.Г.* О возможности картографирования физико-географических зон тепловой космической съёмкой // Доклады Академии Наук. География, 2006. – Т. 411. – №5. – С. 684-686.
15. *Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И.* Тепловая аэрокосмическая съёмка. – М.: Недра, 1993. – 128 с.
16. *Грищенко М. Ю.* Методика дешифрирования тепловых космических снимков для картографирования природных и антропогенных территорий // Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 2015. – 199 С.
17. *Данилова И. В., Рыжкова В. А., Корец М. А.* Алгоритм автоматизированного картографирования современного состояния и динамики лесов на основе ГИС // Вестник НГУ, Серия: информационные технологии, 2010. – Том 8. – Выпуск 4. – С. 15-24.
18. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. – М.: Физматгиз, 1963.
19. Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95). – М.: ЦНИИГАиК, 2000. – 28 С.
20. *Емельянов О.Г.* Определение углов наклона дна по цифровой модели рельефа // Геодезия и картография, 1984. – № 11 – С. 37-40.
21. *Зареи С.* ГИС-картографирование на основе моделирования микроклимата и грунтового стока в условиях области Йезд Республики Иран // Вестник СПбГУ. 2016. – Сер. 7. – Вып. 1.
22. *Зареи С. Щербаков В. М.* Природно-ресурсное районирование провинции Хузестан Ирана с применением термического дистанционного зондирования Земли и геоинформационного картографирования // Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 110-121.
23. *Зареи С., Абузар Н., Щербаков В.М., Широкова В.А.* Применение алгоритма расщеплённого окна для расчёта температуры земной поверхности на основе материалов тепловой космической съёмки // Успехи современного естествознания, 2017. – № 6. – С. 77-82.
24. *Зареи С., Малинников В.А.* Картографирование состояния природно-ландшафтных ресурсов провинции Хузестан Ирана с использованием автоматизированного дешифрирования разновременных космических данных // Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъёмка», 2017. – № 6. – С. 82-90.
25. *Зареи С., Малинников В.А., Щербаков В. М., Насири А.М.* Опыт оценочного геоинформационного картографирования состояния ландшафтных ресурсов по материалам спутникового зондирования на примере провинции Ирана Хузестан // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. – Т. 14. – № 7. – С. 119-127.
26. *Заруцкая И. П., Красильникова Н. В.* Проектирование и составление карт. Карты природы. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 С.
27. *Зворыкин К.В.* (ред.) Количественные методы изучения природы. – М.: Мысль, 1975. – 216 С.
28. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Математическая статистика.- М.: Высшая школа, 1984.
29. *Капралов Е. Г., Коновалова Н. В.* Введение в ГИС: Учеб.пособие. – Изд. 2-е, испр. И под. – М.: ГИС-Ассоциация, 1997. – 155 С.
30. *Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. И др.* Основы геоинформатики: Учеб. пособие/ Под ред. В. С. Тикунова. – М.: Издат. Центр «Академия», 2004. – Кн. 1—352 С.; Кн. 2 – 480 С.

31. Капралов Е.Г., Тикунов В.С., Заварзин А.В., Ильясов А.К., Кравцова В.И., Лурье И.К., Рыльский И.А. Сборник задач и упражнений по геоинформатике 2-е изд. – М.: Академия, 2009. – 512 С.
32. Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Известия РАН. Серия Географическая, 2008. – №4 – С. 112-124.
33. Кошкарёв А. А., Тикунов В. С. Геоинформатика/ под ред. Лисицкого Д. В. – М.: Картгеоцентр – Геоиздат, 1993. – 213 С.
34. Кошкарёв А. В. Понятия и термины геоинформатики и ее окружения: Учебно-справочное пособие. Российская академия наук, Институт географии. – М.: ИГЕМ РАН, 2000. – 76 С.
35. Кузавкова З. О., Наговицина Е. И., Солпина Н. Г. Методика создания карты ландшафтов масштаба 1:100 000 // Известия Иркутского государственного университета, 2016. – Т. 18. – Серия «Науки о Земле». – С. 39–55.
36. Лебедева О.А. Картографические проекции. – Новосибирск: Новосибирский учебно-методический центр по ГИС и ДЗ, 2000. – 37 С.
37. Лурье И. К. Геоинформатика. Учебные геоинформационные системы: Учеб.-метод. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 115 С.
38. Лурье И. К. Основы геоинформатики и создание ГИС / дистанционное зондирование и географические информационные системы / Под ред. А. М. Берлянта. – М.: ООО «ИНЭКС-92», 2002. – Ч. 1. – 140 С.
39. Маловичко А.К. Картографические вычисления. – Новосибирск: НИИГАиК, 1949. – 32 С.
40. Маслов А.В. Способы и точность определения площадей. – М.: Геодезиздат, 1955. – 227 С.
41. Мирзаев Г.Г., Иванов Б.А., Щербаков В.М. Картографический метод исследований в инженерной экологии. – Л.: Ленинградский горный институт, 1988. – 95 С.

42. *Паниди Е.А.* Моделирование полей видимости в среде ArcGIS средствами приложения «Картометрия». // Вестник СПб ун-та, 2012. – Сер.7. – Вып.1. – С. 121-129.
43. *Поллард Дж.* Справочник по вычислительным методам статистики.- М.: Финансы и статистика, 1982.
44. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исследования Земли из космоса, 2009. – №5. – С. 3-10.
45. *Салищев К.А.* (ред.) Новые методы в тематической картографии. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 129 С.
46. *Салищев К.А.* Картоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 400 С.
47. *Серапинас Б.Б.* Математическая картография. – М.: Издательский центр Академия, 2005. – 336 С.
48. *Тикунов В. С.* Моделирование в картографии. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 405 С.
49. *Тикунов В.С.* (ред.) Геоинформатика. В двух книгах. – М.: Академия, 2008. – 384 С.
50. *Тронин А.А.* Возможности применения космической тепловой съёмки для исследования землетрясений // Исследования Земли из космоса, 2005. – №4. – С. 86-89.
51. *Трофимова И.Е., Коновалова Т.И.* Оценка теплового состояния ландшафтов Южного Прибайкалья дистанционными методами // География и природные ресурсы, 1996. – №4. – С. 61-71.
52. *Трофимова И.Е., Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П.* Экспериментальные исследования аэродистанционными методами теплового состояния геосистем // География и природные ресурсы, 1998. – №1. – С. 22-26.

53. *Фадеева Н.В.* Изучение природных комплексов на основе картографической модели. – М.: Наука, 1979. – 100 С.
54. *Филатов Н. Н.* Географические информационные системы. Применение ГИС при изучении окружающей среды: Учеб.пособие. – Петрозаводск: Изд-во КГПУ, 1997. – 104 С.
55. *Флоринский И.В.* Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 2010. – 42 С.
56. *Фокин Е.И.* О точности определения углов наклона местности, получаемых по топографическим картам // Труды государственного научно-исследовательского центра изучения природных ресурсов, 1986. № 27. – С. 117-121.
57. *Харазми Р., Паниди Е.А., Каркон Варносфадерани М.* Оценка динамики аридных экосистем на основе временных рядов космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. – Т. 13. – № 5. – С. 214–223.
58. *Харук В.И., Кожуховская А.Г., Пестунов И.А., Рэнсон К.Дж., Цибульский Г.М.* Съёмка NOAA/AVHRR в мониторинге вспышек сибирского шелкопряда // Исследования Земли из космоса, 2001. – №1. – С. 80-86.
59. *Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н.* Современное состояние ландшафтной экологии // Известия РАН. Серия Географическая, 2006. – №5. – С. 12-21.
60. *Чандра. А. М., Гош С. К.* дистанционное зондирование и географические информационные системы. Техносфера, Москва, 2008. – 312 С.
61. *Червяков В.А. и др.* Модели полей в географии: теория и опыт картографирования. – Новосибирск: Наука, 1989. – 144 С.
62. *Шайтура С. В.* Технологии создания и использования учебных геоинформационных систем (на примере MapInfo). Учебное пособие.—М.: МИИГАиК, 2001 – 71 –.

63. *Шилин Б.В.* Тепловая аэросъёмка при изучении природных ресурсов // Л.: Гидрометеоздат, 1980.
64. *Ширяев Е.Е.* Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. – М.: Недра, 1984. – 248 С.
65. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений // М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
66. *Щербаков В.М.* Экспертно-оценочное ГИС-картографирование. СПб. Проспект науки, 2011.
67. *Ющенко А.* Картография. – Л.: Изд. Главсевморпути, 1941. – 284 С.
68. *Ярыгина Н.Б.* Использование программного комплекса ENVI для решения задач лесного хозяйства // М. Геоматика, 2011. – № 3.
69. *Andre C., Ottele C., Royer A., and Maignana F.* Land surface temperature retrieval over circumpolar Arctic using SSM/I–SSMIS and MODIS data // *Remote Sensing Environment*, 2015. – 162. – С. 1-10.
70. *ArcGIS Desktop Developer Guide.* – ESRI, 2004. – 324 p.
71. *Baihua, F. and Isabela, B.* Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater // *J. Arid Environment*, 2015. – 113. – 59–68.
72. *Baojuan, Z., Soe, W. M., Prasad S. T., and Rimjhim M. A.* A support vector machine to identify irrigated crop types using timeseries Landsat NDVI data // *Int. J. Appl. Earth Obs.*, 2015. – 34. – 103-112.
73. *Beck A., Anderson G. P., Acharya P. K., Chetwynd J. H., Bernstein L. S., Shettle E. P., Matthew M. W., and Adler-Golden S. M.* MODTRAN4 User's Manual. Hanscom AFB, MA, USA: Air Force Res. Lab., 1999.
74. *Bingwei, T., Ling, W., Koki K., and Katsuaki.* Combination of Well-Logging Temperature and Thermal Remote Sensing for Characterization of Geothermal Resources in Hokkaido, Northern Japan // *Remote Sensing*, 2015, 7, 2647–2667.

75. *Bishop, Y., Fienberg, S., and Holland, P.* Discrete Multivariate Analysis – Theory and Practice, MIT Press, Cambridge, MA, 1975. – 575 pp.
76. *Chavez, P.S., Jr.* An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data // Remote Sens. Environ. 1988. – 24. – 459-479.
77. *Coll, C.; Caselles, V.; Sobrono, J.A.; Valor, E.* On the Atmospheric Dependence of the Split-Window Equation for Land Surface Temperature // Int. J. Remote Sens. 1994. – 15. – 105-122.
78. *Dech S.W., Tungalagsaikhan P, Preusser C, Meisner R.E.* Operational value-adding to AVHRR data over Europe: methods, results, and prospects. Aerosp Sci Technol 2: 1998. – 335–346.
79. *Dehghan, A. A.* Status and potentials of renewable energies in Yazd Province-Iran // Renew. Sust. Energ. Rev., 2011. – 15. – 1491-1496.
80. *Dehua, M., Zongming, W., Ling, L., and Chunying, R.* Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China // Int. J. Appl. Earth Obs., 2012. – 18. – 528-536.
81. *Deschamps, P.; Phulpin, T.* Atmospheric Correction of Infrared Measurements of Sea Surface Temperature Using Channels at 3.7, 11 and 12 Mm // Bound. Layer Meteorol, 1980. – 18. – 131-143.;
82. *Eisele A., Chabrillat S., Hecker C., Hewson R., Lau I.C., Rogass C., Segl K., Cudahy T.J., Udelhoven T., Hostert P., Kaufmann H.* Advantages using the thermal infrared (TIR) to detect and quantify semi-arid soil properties // Remote Sensing of Environment, 2015. – 163. – pp. 296-311.
83. *Emre Ozelkan, Gang Chen, Burak Berk Ustundag.* Multiscale object-based drought monitoring and comparison in rainfed and irrigated agriculture from Landsat 8 OLI imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Volume 44, February 2016, – 159-170.

84. *Fei Yuan, Marvin E. Bauer.* Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*, 2007. – 106. – 375-386.
85. *Florinsky I.V.* Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid // *Geographical information science*, 1998. – Vol. 12. – No. 8. – pp. 829-852.
86. *France, G. B. and Cracknell, A. P.* Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in north-eastern Brazil // *Int. J. Remote Sens.*, 1994. – 15. – 1695-1712.
87. *Franklin W.R.* Applications of Analytical Cartography // *Cartography and Geographyc Information Science*, 2000. – Vol. 27. – No. 2. – pp. 225-237.
88. *Gong, Z., Kawamura, K., Ishikawa, N., Goto, M., Wulan, T., Alateng, D., Yin, T., and Ito, Y.* MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia grassland // *Solid Earth*, 2015. – 6. – 1185–1194. – doi:10.5194/se-6-1185-2015.
89. *Goossens, R., D’Haluin, E. and Larnoe, G..* Satellite Image Interpretation (SPOT) for the Survey of the Ecological Infrastructure in a Small Scaled Landscape (Kempenland, Belgium). 1991. – *Landscape Ecol.* – 5(3):. – 175–182.
90. *Graetz, R. D.* Remote sensing of terrestrial ecosystem structure: An ecologist’s pragmatic view. In *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. 1990. – pp. 5–30. Edited by R. J. Hobbs and H. A. Mooney. Springer-Verlag, New York.
91. *Greegor, D. H., Jr.* Ecology from space. 1986. – *Bioscience* 36(7):. – 429–432.
92. *Guanhua, G., Zhifeng, W., Rongbo, X., Yingbiao, C., Xiaonan, L., and Xiaoshi, Z.* Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters // *Landscape Urban Plan.*, 2015. – 135. – 1-10.
93. *Gyanesh Chander, Brian L. Markham, Dennis L. Helder.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*, 2009. – 113. – 893-903.

94. *Haines-Young, R. H., Green, D. R. and Cousins, S. H. (Eds.). Landscape Ecology and GIS. Taylor and Francis, London. – 1994.*
95. *Hamrah, M. Moghimi S. J. Cartography, Gitashenasi Cartographic & Geographical Institue, 2009. – 374 C.*
96. *Herstrom A.A. Geographic Information Systems: Some considerations for use in geographic research and analysis // A research paper. Oregon state university, 1984. – 71 p.*
97. *Ibrahim Rizk Hegazy, Mosbeh Rashed Kaloop. Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt // International Journal of Sustainable Built Environment, June 2015. – Vol. 4. – Issue 1. – 117-124.*
98. *Iverson, L. R., Cook, E. A. and Graham, R. L. Regional forest cover estimation via remote sensing: The calibration center concept. 1994. – Landscape Ecol. – 9(3):. – 159–174.*
99. *Jinqu Z., Yunpeng W., Yan L. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band 6 // Computers & Geosciences, 2006. – 32. – 1796-1805.*
100. *Jose, A., Sobrinoa, J., Jiménez-Muñoz, C., and Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. Environ., 2004. – 90. – 434-440.*
101. *Juan, C., Jiménez-Muñoz, J., Sobrino, A., Skokovic, D., Mattar, C., and Cristóbal, J. Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data, IEEE Geosci // Remote S., 2014. – 11. – 1840-1843.*
102. *Khosravi H., Haydari E., Shekoohizadegan S., Zareie S. Assessment the Effect of Drought on Vegetation in Desert Area using Landsat Data // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 2017. – 20. – S3-S12.*

103. *Kuenzer C. and Dech S.* Thermal Infrared Remote Sensing - Sensors, Methods, Applications // Remote Sensing and Digital Image Processing Series, 2013. – Vol. 17. – 572 p.
104. *Li Z.-L., Tang B.-H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // Remote Sensing of Environment. 2013. – Vol. 131. – p. 14–37.
105. *Luvall, J. C. and Holbo, H. R.* Thermal Remote Sensing Methods in Landscape Ecology. In Quantitative Methods in Landscape Ecology. 1991. – pp. 127–152. Edited by M. G. Turner and R. H. Gardner. Springer-Verlag, New York.
106. *Mallick, J., Kant, Y., and Bharath, B. D.* Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+// Ind. Geophys. Union, 2008. – Vol. 12. – No.3. – pp. 131-140.
107. *Metzger, J. P. and Muller, E.* Characterizing the complexity of landscape boundaries by remote sensing. 1996. – Landscape Ecol. – 11(2):. – 65–77.
108. *Moody, A. and Woodcock, C. E.* The influence of scale and the spatial characteristics of landscapes on land-cover mapping using remote sensing. 1995. – Landscape Ecol. – 10(6):. – 363–379.
109. *Oppenheimer C.* Volcanological applications of meteorological satellites // International Journal of Remote Sensing. 1998. – Vol. 19. – p. 2829-2864.
110. *Owen, T. W., Carlson, T. N., and Gillies, R. R.* Remotely sensed surface parameters governing urban climate change // Int. J. Remote S., 1998. – 19. – 1663-1681.
111. *Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T.* Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval // Remote Sensing of Environment, 2006. – Vol. 104. – p. 211-225.
112. *Qihao W., Dengsheng L., Jacquelyn S.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment, 2004. – 89. – 467-483.

113. *Qin, Z.; Dall'Olmo, G.; Karnieli, A.; Berliner, P.* Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-Advanced very High Resolution Radiometer Data // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2001. – 106. – 22655-22670.
114. *Quattrochi D.A. and Luvall J. C.* Thermal Remote Sensing and Land Surface Processes. Boca Raton, London, New York Washington, D.C., 2005, 440 p.
115. *Quattrochi D.A., Luvall J.C.* Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications // *Landscape Ecology*, 1999. – Vol. 14. – p. 577–598.
116. *Quattrochi, D. A. and Pelletier, R. E.* Remote Sensing for Analysis of Landscapes: An Introduction. In *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. 1991. – pp. 51–76. Edited by M. G. Turner and R. H. Gardner. Springer-Verlag, New York
117. *Rajeshwari A, Mani N D.* Estimation of land surface temperature of Dindigul district using Landsat 8 data, 2014. – 03-05.
118. *Rawata J.S., Manish Kumar.* Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, June 2015. – Vol. 18. – Issue 1. – 77-84.
119. *Risser, P. G., Karr, J. R. and Forman, R. T. T.* Landscape Ecology: Directions and Approaches. Illinois Natural History Survey Special Publication Number 2. Report on a workshop held at Allerton Park, Piatt County, Illinois, April 1983. – Illinois Natural History Survey, Champaign, Illinois.
120. *Russell G. Congalton.* A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data // *Remote Sensing of Environment*, 1991. – 37. – 35-46.
121. *Sabins F.F.* Remote sensing, 3rd edn. Wiley, New York. – 1996. – 450pp.

122. *Salisbury J. W. and D'Aria, D. M.* Emissivity of Terrestrial Materials in the 2 to 5 micro meter Atmospheric Window // *Remote Sensing Environment*, 1994. – 47. – 345-361.
123. *Salisbury, J. W. and D'Aria, D. M.* Emissivity of Terrestrial Materials in the 8 to 14 micro meter Atmospheric Window // *Remote Sensing Environment*, 1992. – 42. – 83-106.
124. *Sandra, E., Fabia, H., Hanspeter, L., and Elias, H.* Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia // *J. Arid Environ.*, 2015. – 113. – 16-28.
125. *Sanjari, S.* Application Guide ARC GIS 10, Abed publications, 2011, 408 c.
126. *Schowengerdt, R. A.* Techniques of Image Processing and classification in Remote Sensing, New York, Academic press, 1993.
127. *Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from Landsat-5/TM // *Remote Sensing of Environment*, 2004. – Vol. 90. – p. 434 – 440.
128. *Sruthi S., Mohammed Aslam M.A.* Agricultural Drought Analysis Using the NDVI and Land Surface Temperature Data; a Case Study of Raichur District. *Aquatic Procedia*, 2015. – Vol. 4. – 1258-1264.
129. *Story, M. and Congalton, R.* Accuracy assessment: a user's perspective, *Photogramm // Eng. Rem. S.*, 1986. – 52. – 397-399.
130. *Streutker, D. R.* Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas // *Remote Sensing Environment*, 2003. – 85. – 282-289.
131. *Tabatabaiefar Ahmad, Nadrlu Leila, Javadikia Payam, Shirkuvand Hossein.* Conservation tillage systems and the product growing // *Collegiate Jihad of Isfahan University of Technology*, 2008. – P. 12.
132. *Tan J., Cherkauer K.A.* Assessing stream temperature variation in the Pacific Northwest using airborne thermal infrared remote sensing // *Journal of Environmental Management*, 2013. – 115. – 206-216.

133. *Tan K.C., Lim H.S., MatJafri M.Z., Abdullah K.* Land Surface Temperature Retrieval by Using ATCOR3_T and Normalized Difference Vegetation Index Methods in Penang Island // *American Journal of Applied Sciences*, 2010. – Vol. 7(5). – p. 717 – 723.
134. *Ting Liu, Xiaojun Yang.* Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics // *Applied Geography*, January 2015. – Vol. 56. – 42-54.;
135. *Tipler P.A.* Physik, 3rd edn. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. – 2000. – 1520pp.
136. *Ulivieri C., Castronuovo M. M., Francioni R., and Cardillo A.* A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites // *Advances in Space Research*, 1994. – 14. – 59-65.
137. *Valor, E. and Caselles, V.* Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African and South American areas // *Remote Sensing Environment*, 1996. – 57. – 167-184.
138. *Virginie Epinat, Alfred Stein, Steven M de Jong, Johan Bouma.* A wavelet characterization of high-resolution NDVI patterns for precision agriculture // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001. – Vol. 3. – Issue 2. – 121-132.
139. *Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*, 2003. – Vol. 86. – p. 370 – 384.
140. *Weng Q.* Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009. – Vol. 64. – p. 335 – 344.4.
141. *Weng Q., Quattrochi D.A.* Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // *Remote Sensing of Environment*, 2006. – Vol. 104. – 119 – 122.

142. *Weng, Q., Lu, D., Schubring, J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing Environment*, 2004. – 89. – 467-483.
143. *Xiaolei, Y., Xulin, G., and Zhaocong, W.* Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS – Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method // *Remote Sens.*, 2014. – 6. – 9829-9852.
144. *Yang J.S., Wang Y.Q., August P.V.* Estimation of Land Surface Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity // *Journal of Environmental Informatics*, 2004. – Vol. 4(1). – p. 37 – 44.
145. *Zareie S. Panidi E.* Study of the relationships between urban land use mosaic and land surface temperature: case study of Yazd city. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2016. – Bulgaria. – Conference Proceedings. – ISBN 978-619-7105-59-9. – ISSN 1314-2704. – June 28 - July 6. – Book 2. – Vol. 2. – p. 1003-1010. – DOI: 10.5593/SGEM2016/B22/S10.128.
146. *Zareie S., Khosravi H., Nasiri A. and Dastorani M.* Using Landsat Thematic Mapper (TM) sensor to detect change in land surface temperature in relation to land use change in Yazd, Iran // *Solid Earth*, 2016. – 7. – 1551-1564.
147. *Zhan W., Zhou J., Ju W., Li M., Sandholt I., Voogt J., Yu C.* Remotely sensed soil temperatures beneath snow-free skin-surface using thermal observations from tandem polar-orbiting satellites: An analytical three-time-scale model // *Remote Sensing of Environment*, 2014. – 143. – 1-14.
148. Аридная растительность мира, Аридная растительность Ирана // URL: <http://ukhtoma.ru/geobotany/asia03.htm> – (Дата обращения: 15.07.2015).
149. Индасад.ру // URL: <http://indasad.ru/lekarstvennyye-rasteniya/3149-evkalipt-lechebnie-svoystva-i-protivopokazaniya-lechenie-evkaliptom> – (Дата обращения: 15.06.2016).

150. Научный центр оперативного мониторинга земли // URL: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites/resurs_p – (Дата обращения: 03.04.2015).
151. Новости космоса (МКС, Марса, Луны), спутники и их запуски // URL: <http://mapgroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/27-rossiya/221-resurs-p-resurs-p-1> – (Дата обращения: 04.04.2015).
152. Ресурс-П // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/resurs-p/> – (Дата обращения: 05.04.2015).
153. Экологический мониторинг учебное пособие // URL: <http://textarchive.ru/c-1617217-p16.html> – (Дата обращения: 28.08.2016).
154. Conversion Tables and Instant Measurement Conversion // URL: www.convert-me.com/ – (Дата обращения: 27.07.2016).
155. Co2.earth, Are we stabilizing yet? // URL: <https://www.co2.earth/>; <http://scrippsco2.ucsd.edu/> – (Дата обращения: 12.07.2016).
156. Earth observation portal, Landsat-7 // <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/landsat-7> – (Дата обращения: 12.06.2015).
157. Erdas // URL: www.erdas.com – (Дата обращения: 19.04.2016).
158. Harris Geospatial Solutions, Atmospheric Correction // <http://www.harrisgeospatial.com/docs/atmosphericcorrection.html#Atmosphe> – (Дата обращения: 19.04.2016).
159. Harris Geospatial Solutions, Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) // <http://www.harrisgeospatial.com/docs/FLAASH.html> – (Дата обращения: 18.04.2016).
160. Harris Geospatial Solutions, Radiometric Calibration // <http://www.harrisgeospatial.com/docs/radiometriccalibration.html> – (Дата обращения: 18.04.2016).
161. Karun River // <https://www.britannica.com/place/Karun-River> – (Дата обращения: 17.03.2016).

162. Компания ESRI // URL: www.esri.com – (Дата обращения: 12.05.2015).
163. Landsat-7 // <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/> – (Дата обращения: 16.05.2015).
164. Landsat-8 // <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/> – (Дата обращения: 15.05.2015).
165. Nasa, Landsat Data Continuity Mission // http://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/20101119_LDCMbrochure.pdf – (Дата обращения: 21.01.2016).
166. Nasa, Landsat // http://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/may/HQ_13-160_Landsat_8_Begins.html#.V_VaM4997IU – (Дата обращения: 25.02.2016).
167. Sharing Earth Observation Resources, Landsat-8 // - Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm> – (Дата обращения: 23.03.2016).
168. United States Environmental Protection Agency // URL: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases> – (Дата обращения: 13.03.2016).
169. USGS: Landsat Missions, Gap-Filling Landsat 7 SLC-off Single Scenes Using ERDAS Imagine 2014™ // http://landsat.usgs.gov/ERDAS_Approach.php – (Дата обращения: 29.08.2016).
170. USGS: Geological Survey, Landsat Missions, What are the best spectral bands to use for my study? // http://landsat.usgs.gov/best_spectral_bands_to_use.php – (Дата обращения: 11.05.2016).
171. USGS: Landsat TM sensor data // available at: <http://earthexplorer.usgs.gov>, last access: 17 October 2016 – (Дата обращения: 19.06.2016).