На правах рукописи

Харазми Расул Сохраб

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ АРИДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.34 -Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре космического мониторинга и экологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК).

Научный руководитель: **Чабан Людмила Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), доцент кафедры вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации.

Официальные оппоненты: **Гук Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет геосистем и технологии (СГУГиТ), профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Стыценко Федор Викторович, кандидат технических наук, Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), научный сотрудник отдела "Технологии спутникового мониторинга".

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский и производственный центр «Природа» (АО «НИиП центр «Природа»)

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д. 212.143.04 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте: http://miigaik.ru/upload/iblock/576/576db891c019c3c863f9b3246f1c1e5e.pdf

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета _____ Беленко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации приведены результаты исследований автора, выполненных в рамках решения научной задачи разработки методики и технологии обработки и анализа временных рядов космических снимков для оценки динамических изменений экосистем в экологически проблемных регионах аридных зон на больших временных интервалах. Исследования, разработки и апробация результатов выполнены на территории бассейна р.Систан.

Актуальность исследования. Аридные регионы являются одними из наиболее проблемных с точки зрения рисков неблагоприятных изменений природных экосистем. Накопленные за последние десятилетия материалы многозональной космической съемки позволяют проследить динамику таких изменений и выявить общий тренд происходящих процессов. Для решения этой задачи необходима разработка методики совместной обработки и анализа временных рядов многозональных космических снимков. В настоящем исследовании методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) применены для оценки состояния и динамики водно-болотных угодий Хамун на 30-летнем временном промежутке. Мониторинг многолетней динамики сезонных изменений земель на основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ) является первым шагом на пути к пониманию причин ландшафтно-экологических изменений, которое, кроме того, требует тщательного климатического и гидрологического анализа.

Объектом исследования стали методы и средства автоматизированной обработки космических изображений.

Целью исследования является разработка методики анализа временных рядов космических снимков для оценки динамики изменений экосистем водно-болотных угодий в бассейне р.Систан.

В исследовании поставлены следующие **задачи:**

1. Провести анализ основных физико-географических свойств бассейна Систан, выявить типы земель, подлежащие дешифрированию;
2. Рассмотреть современные методы обработки космических снимков и осуществить выбор методов и схемы обработки данных, пригодных для изучения

рассматриваемой территории, провести экспериментальное исследование эффективности методов дешифрирования;

3. Разработать методику автоматизированного анализа космических снимков, позволяющую обеспечить корректное сопоставление результатов обработки временных рядов космических снимков;

4. Исследовать возможности выявления сезонной динамики экосистем бассейна Систан на основе независимого дешифрования разновременных космических снимков одного и то же участка местности, обеспечить сопоставление результатов обработки временных рядов, проанализировать результаты дешифрирования данных за период с 1987 по 2016 гг. и оценить достоверность результатов дешифрирования;

5. Определить моменты времени, наиболее репрезентативные для оценки состояния и динамики экосистем на исследуемой территории, и оценить тенденции изменения площади различных типов земель за последние 30 лет.

Фактический материал. В основу работы положены данные полевых наблюдений 2014-2015 гг. Также использовались многозональные снимки (съёмочная аппаратура TM, ETM^{+}, OLI спутников серии Landsat), полученные с 1987 по 2016 г., в периоды трёх сезонов, и снимки сверхвысокого пространственного разрешения, находящиеся в открытом доступе.

Методы. При проведении исследования применены методы многомерного статистического анализа, кластерного анализа, классификации многомерных данных. Анализ ДДЗ проводился в программных продуктах ERDAS Imagine и ENVI. Подготовка картографического материала осуществлялась в пакете ArcGIS.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены сбор фактического материала, в том числе полевого, обработка ДДЗ, статистический анализ результатов обработки полевых данных и ДДЗ и формализация выводов.

Научная новизна исследования состоит в том, что:

1. Определены и реализованы в технологии автоматизированного дешифрирования требования к сопоставимости исходных данных и результатов тематической классификации разновременных космических снимков аридных зон на большом временном интервале, а именно:

- приведение всех снимков к единой яркостной шкале путем атмосферной коррекции;
- идентичное для всех снимков количество и тематическое содержание выделяемых в границах обследуемой территории классов;
- контроль идентичности положения эталонов классов в пространстве спектральных сигнатур по всем дешифрируемым снимкам.

2. Впервые по единой методике, основанной на указанных выше принципах, обработаны мультиспектральные снимки со спутника Landsat, полученные в течение тридцати лет для трех сезонов года, что позволило:
- описать общую тенденцию и количественные изменения основных типов земель на исследуемой территории за 30-летный период наблюдений;
- на основе анализа трендов относительной площади основных типов земель определить, что наиболее репрезентативным показателем, отражающим негативную динамику экологической ситуации, является доля площади обводненных земель в границах исследуемой территории;
- на основе ГИС-анализа результатов дешифрирования по трем сезонам годичного цикла, выделенным по климатическим особенностям исследуемого региона, определить наиболее репрезентативный сезон для анализа тенденций в изменении типов земель региона.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке методики и технологических решений, обеспечивающих сопоставимость результатов автоматизированной обработки серий разновременных космических снимков для их совместного геоинформационного анализа при длительном космическом мониторинге экологически проблемных территорий аридных зон.

Практическая значимость. Результаты исследования показали, что при анализе динамики экосистем на основе долговременного дистанционного мониторинга необходим учет сезонных факторов, специфических для исследуемой территории. Для анализируемой в работе территории важным результатом является вывод о том, что наиболее репрезентативным показателем негативной динамики экосистем является доля площади обводненных территорий,

а не проективное покрытие растительностью, использованное ранее в ряде работ. Данный факт необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований территории данного региона.

Защищаемые положения.

1. Методика и технология автоматизированного тематического дешифрирования разновременных космических снимков, обеспечивающая возможность выявления и количественной оценки изменений типов земель в аридных регионах.
2. Результаты практического применения методики к анализу динамических процессов в системе водно-болотных угодий бассейна р.Систан, состоящие в следующем:

- выявлено, что после засухи в 2000 г. в регионе установилась устойчивая тенденция к опустыниванию, на которую не оказывают значительного влияния изменения речного притока;
- показано, что наиболее репрезентативным сезоном для определения тенденций изменения земель в регионе Систан, с учетом комплекса природных и антропогенных факторов, является осень, когда состояние экосистемы отражает влияние всех природных факторов, воздействующих на нее в течении годичного цикла;
- выявлено, что наиболее репрезентативным показателем, отражающим негативную динамику состояния природных экосистем региона, является доля площади обводненных земель, при этом на доле площади под растительностью негативные изменения отражаются слабо.

Достоверность научных и практических результатов проведенных исследований подтверждается проведенными автором наземными обследованиями на территории региона и согласованностью полученных результатов с результатами анализа состояния экосистем региона по отдельным временным срезам, полученными на данную территорию другими авторами.

Апробация работы. Результаты исследования представлены на международных конференциях GIAN (Тегеран, Иран, 2014), 1st International Conference on New Findings of Agricultural Science, Natural Resources and Environments (Тегеран, Иран, 2015), 1st International Conference on Natural Hazards

and Disaster Management (Осака, Япония, 2017). По теме диссертации опубликовано 5 научных статьи, в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 2 статьи в изданиях, учитываемых международными индексами цитирования Scopus.

Диссертация по своей актуальности, полученным результатам, их новизне, теоретической и практической значимости соответствует следующим пунктам паспорта специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия:

П.4 « Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований»;

П.5 « Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза».

Структура работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Диссертация изложена на 143 странице, содержит 45 рисунков, 10 таблиц, 14 формул. Список литературы включает 177 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные научные и практические результаты.

В первом разделе освещены существующие системы ДЗЗ. Описаны параметры съемочной аппаратуры космических спутников, их спектральное, пространственное и временное разрешение, полоса обзора. Приведена характеристика съемочной аппаратуры Landsat. Представлены основные принципы построения систем дешифрирования ДДЗ. Описаны спектральные характеристики объектов земной поверхности. Рассмотрены современные средства получения космической информации, которые позволяют решить разные задачи изучения динамики аридных экосистем. Приведено описание вегетационных индексов NDVI и SAVI.

Во втором разделе даются физико-географическая и экономико-географическая характеристики изучаемого региона. Перечислены существующие экологические проблемы водно-болотных угодий Хамун.

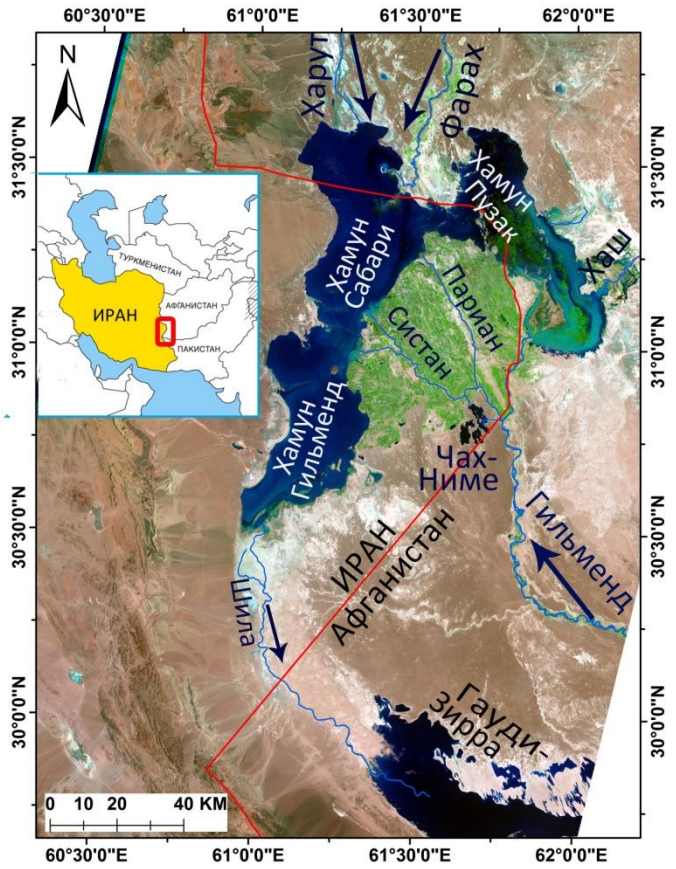

Рис. 1. Местоположение бассейна Систан и компоненты угодий Хамун

Бассейн Систан, расположенный на востоке Ирана и в западной части Афганистана (Рис. 1), является исключительной областью, которая, благодаря подаче воды из водно-болотных угодий Хамун и реки Гильменд, имеет достаточно высокую плотность населения, и в которой представлены несколько видов сельскохозяйственной деятельности. В последние годы экосистема озера претерпевает существенные изменения. Систан находится в нижней части большого бессточного бассейна, в одном из самых засушливых регионов мира и разделяется на три района: верхняя равнина в дельте реки Гильменд, которая в основном осушена и занята сельхозугодьями; водно-болотные угодья Хамун на нижней равнине дельты; и гиперминерализованное озеро Гауди-зирра в нижней части бассейна, которое собирает избыток воды с водно-болотных угодий через реку Шила. Основной экологической проблемой является неспособность рек донести достаточное количество воды.

Годовое количество осадков в бассейне Систан составляет около 50 мм. Вследствие этого полноценные жизнедеятельность и хозяйственная деятельность возможны только при условии доступности внешних источников воды.

В случае бассейна Систан таким источником является река Гильменд, приносящая талую воду с гор Гиндукуш на востоке Афганистана. Также три малых пересыхающих реки - Хаш, Фарах и Арашкан - собирают воду с западной части Гиндукуша в дождливый сезон, значительно способствуя пополнению

бассейна. Обширные покрытые водой территории с тростниковыми зарослями оказывают положительное влияние на местный климат. Водные объекты имеют малую глубину (в среднем, 1,5 м), а также характеризуются высокой внутригодовой динамикой, вплоть до полного пересыхания.

Для контроля распределения воды, поступающей на орошаемую равнину Систан, на иранской стороне в 1980 г. построено водохранилище Чах-ниме, его площадь варьируется от 2500 га до 13100 га в зависимости от притока воды, объём достигает 1530 млн $м^3$, что делает Чах-ниме вторым наиболее важным водохранилищем в бассейне Гильменд.

Продолжительные засухи, когда реки не приносят достаточного количества воды, чтобы заполнить озера и водно-болотные угодья и, следовательно, обеспечить орошение сельскохозяйственных земель, произошли в конце 1960-х, середине 1980-х, а также между 1999 и 2005 гг. Последняя засуха продолжалась исключительно долго, превращая озеро в бесплодную пустыню. Нехватка воды разрушила экологическую систему водно-болотных угодий и нанесла ущерб сельскому хозяйству дельты, которое, в первую очередь, основано на орошении из реки Гильменд.

У водно-болотных угодий Хамун есть естественный ежегодный гидрологический цикл, подразумевающий, что каждый год уровень воды поднимается весной и опускается с апреля по январь, а большая часть угодий регулярно высыхает. В этой системе засуха играет важную экологическую роль, например, в поддержании тростников как доминирующего вида растений. Лето в регионе характеризуется регулярными 120-дневными ветрами, к концу сезона приносящими песок из высохших озер в окрестные деревни.

В третьем разделе представлена разработанная методика автоматизированной обработки космических снимков и проанализирована сезонная динамика бассейна Систан по результатам автоматизированной обработки мультиспектральных космических снимков.

Изучаемая область занимает площадь 5950 $км^2$ и представляет собой равнинную местность с водно-болотными угодьями, где основным типом растительности является тростник.

Для достижения цели, поставленной в рамках исследования, необходимо выявить и охарактеризовать динамику следующих классов объектов на территории: территории водных объектов, территории, покрытие растительностью, территории, лишенные растительности.

В результате проведённых работ была формализована методика тематической обработки временных рядов космических снимков при проведении мониторинга изменений типов земель в засушливых областях (Рис. 2).

Рис. 2. Блок-схема, отражающая состав методики тематической обработки временного ряда космических снимков

С целью определения наилучшего периода в годовом гидрологическом цикле для анализа многолетней динамики было выделено три сезона года, отличающиеся по климатическим факторам, действующим на экосистемы региона: весна (до апреля, период активной вегетации), лето (с июня по август,

период непрерывных 120-дневных ветров, испарение, достигающее 5000 мм), осень (итог сезона после сильного испарения в летнее время).

Выделение сезонов в рамках исследования использовано в связи с прерывистостью рядов данных Landsat. Для подбора космических снимков изучен весь доступный архив данных Landsat за последние 30 лет, и отобраны все пригодные для анализа снимки, с учётом сезонов. При этом обеспечивать точное совпадение дат съёмки год к году необходимости не было, обеспечивалось лишь наличие данных в пределах сезона. Следует отметить, что календарные границы сезонов в данном случае условны.

В работе использовались все идентичные каналы изображений в видимом, ближнем ИК и коротковолновом ИК диапазонах (каналы 1-5 и 7 снимков Landsat-5 и Landsat-7, каналы 1-6 снимков Landsat-8). Чтобы полностью охватить исследуемую территорию, для каждого временного среза была построена мозаика из двух изображений.

При тематической обработке временных рядов мультиспектральных снимков возникают следующие проблемы, которые были решены при создании методики обработки временных рядов космических снимков:

- Приведение всех снимков к единой шкале измерений спектральной отражательной способности;
- Выбор классов земной поверхности, представленных на всех снимках временного ряда и имеющих устойчивые спектральные признаки;
- Разработка методики подготовки обучающих данных и выбор метода классификации, обеспечивающий наилучшую точность результата по всем снимкам временного ряда.

Для корректного сопоставления выделяемых классов по спектральным признакам была выполнена атмосферная коррекция всех снимков через модуль FLAASH в пакете ENVI 5.1. При совместном автоматизированном дешифрировании временного ряда снимков, полученных различными сенсорами, выполнение атмосферной коррекции является необходимым этапом, так как должна быть обеспечена полная идентичность спектральных характеристик выделяемых классов по всем анализируемым снимкам. Приведение всех снимков

к единой яркостной шкале (коэффициентам отражения), позволяет выбрать идентичные эталоны при классификации ретроспективных изображений. Положение эталона в пространстве признаков можно использовать для дешифрирования других снимков, поскольку проведена атмосферная коррекция и спектральные диапазоны каналов приблизительно одинаковы.

Автоматизированное дешифрирование всех снимков временного ряда выполнялось в пакете ERDAS путем контролируемой классификации.

Так как ранее собранные наземные данные для территории исследования отсутствовали, подбор тестовых участков выполнялся в несколько этапов.

На первом этапе, чтобы получить общую характеристику землепользования на территории и изучить спектральные характеристики основных типов земель, была выполнена неконтролируемая классификация всей территории бассейна реки Систан по снимкам за июнь 2014 г. и июль 2015 г. (Рис. 3)

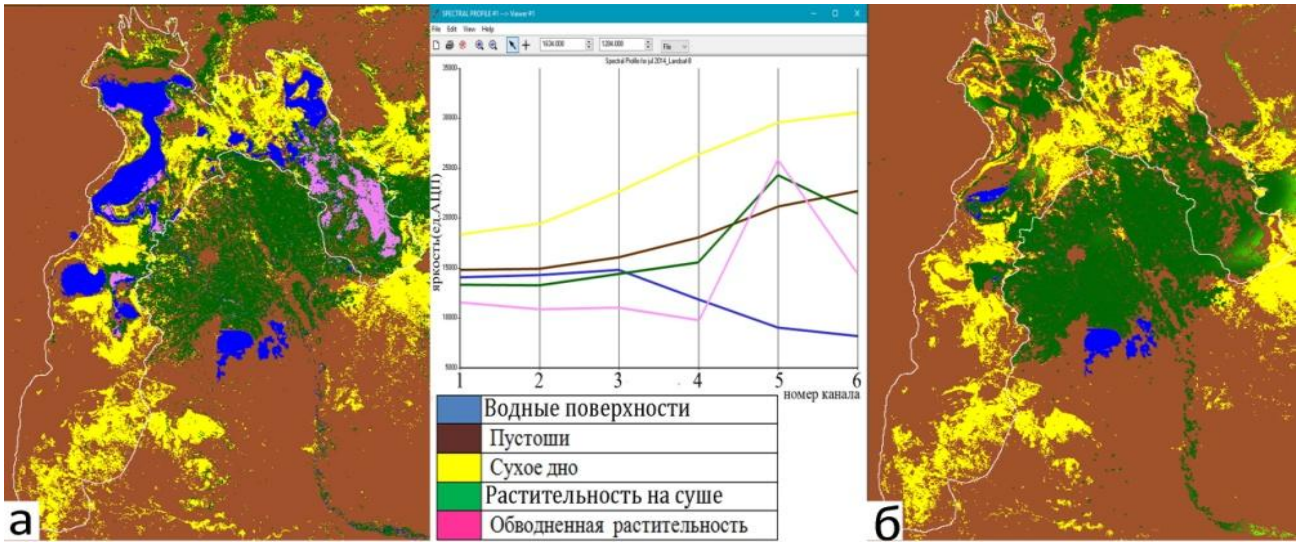

Рис. 3. Результат неконтролируемой классификации территории бассейна Систан в июне 2014 г.(а) и в июле 2015 г. (б) и спектральные профили основных тематических классов, выделенных на территории

Анализ результатов неконтролируемой классификации территории бассейна Систан показал, что пустоши, травянистая растительность и вода имеют специфические особенности спектральной отражательной способности, характерные для данной природно-географической зоны (Рис. 3). Поэтому для интерпретации классов были использованы спектральные профили, которые позволили точнее интерпретировать смешанные подклассы.

На втором этапе, для контроля точности полученных результатов неконтролируемой классификации и отбора типичных спектральных профилей, были выбраны 20 контрольных точек для каждого класса, которые были верифицированы в результате полевых обследований (Рис. 4).

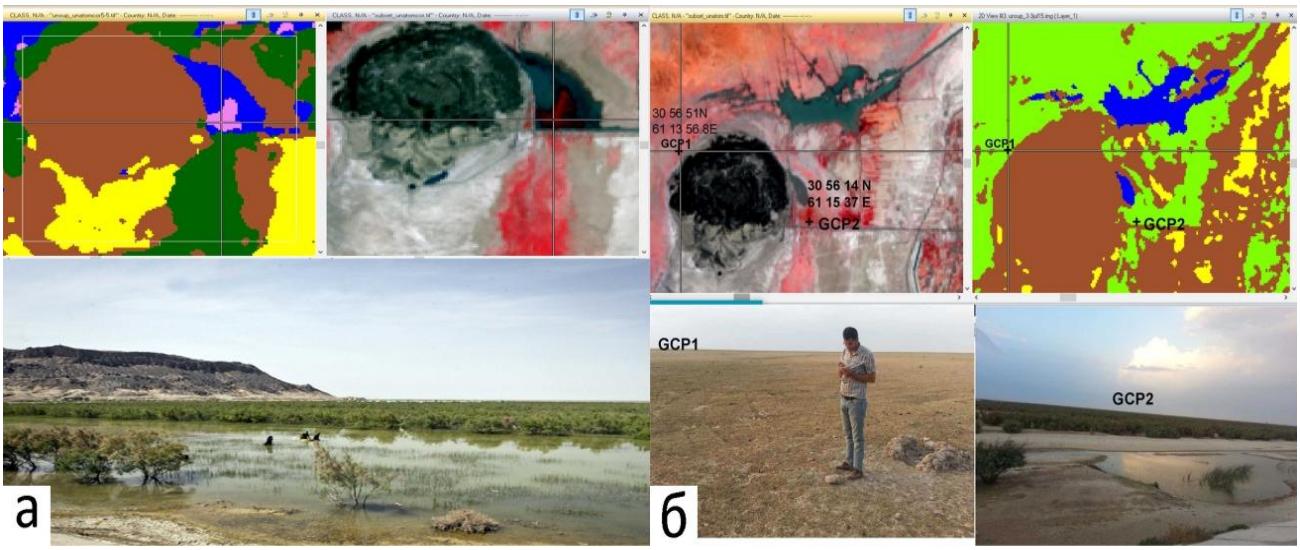

Рис. 4. Обводнённая растительность на классифицированном изображении, на космическом снимке и на фотоизображении местности в 2014 г. (а), контрольные точки на космическом снимке и на классифицированном изображении, и их вид на местности в 2015 г.(б)

Результаты наземных наблюдений показали, что спектральные профили корректно отражают типы земель изучаемой территории, и могут быть использованы для выбора эталонных участков.

С целью исследования изменений естественного растительного покрова угодий Хамун, на разновременных снимках изучаемой территории была ограничена область угодий Хамун-Гильманд, Хамун-Сабари и Хамун-Пузак, в составе которых отсутствуют сельскохозяйственные земли.

Для построения эталонов во всех временных рядах, на основе полученных спектральных профилей основных типов земель в 2014 и 2015г. были отобраны контрольные точки, вокруг которых выбраны аналогичные пиксели с помощью инструмента "Region Grow". В зависимости от размеров аналогичных участков, были отобраны от 100 до 400 пикселей, на основе которых были построены эталоны по наиболее типичным участкам каждого из основных классов, соответствующих примерно центральным спектральным сигнатурам этих классов.

Для каждого класса были выбраны 10 участков в разных частях изображения, затем эти участки были объединены в один класс. Выделенные

участки имели примерно одинаковый размер. Для этой территории сравнивались топографическая карта, спектральные профили, полученные в результате неконтролируемой классификации, снимки сверхвысокого пространственного разрешения, доступные в архиве Google Earth, фотографии местности, также доступные в Google Earth для некоторых участков исследуемого региона, результаты наземных исследований, а также результаты ранее проведенных в данном регионе научных исследований. В ситуациях, когда тип земель для контрольного участка совпадал в соответствии со всеми доступными источниками информации, выбранный участок становился эталонным (рис.5).

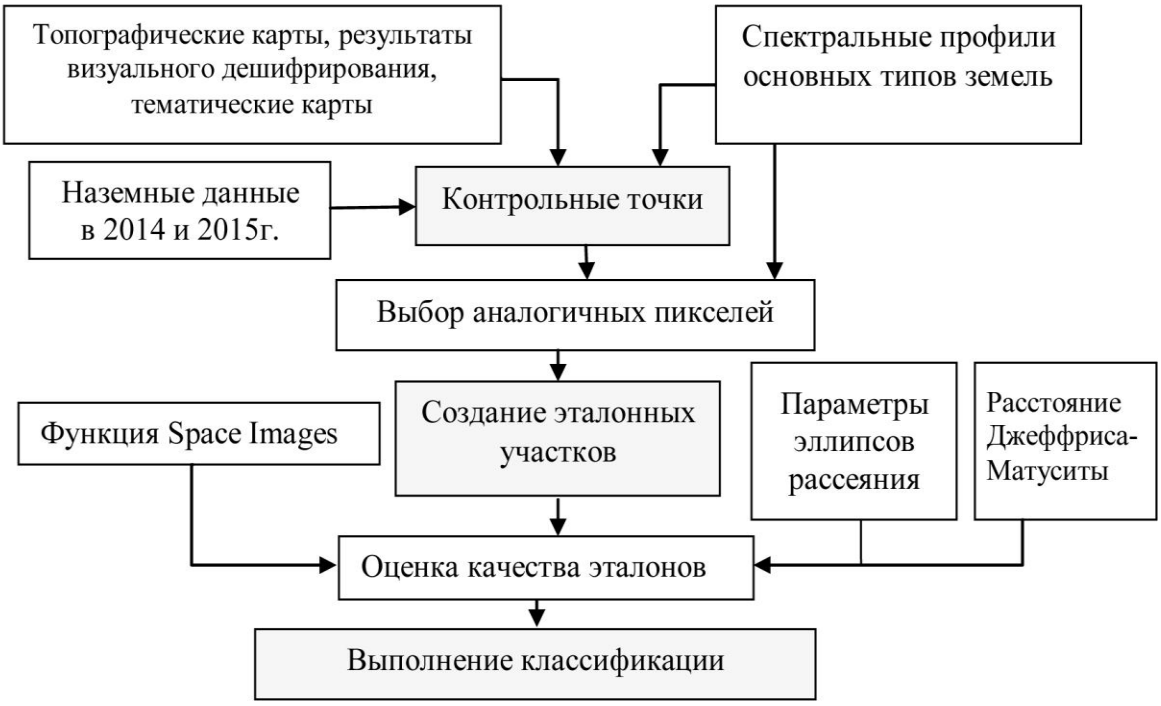

Рис. 5. Блок-схема подготовки эталонов для классификации с обучением

Оценка качества эталонов выполнялись с использованием расстояния Джеффриса-Матуситы и параметров эллипсов рассеяния в пространстве спектральных признаков (рис.6). Расстояние Джеффриса-Матуситы является широко используемым критерием статистической разделимости, учитывающим расстояние между средними значениями классов и распределение отклонений значений от средних по классам.

Разработанный алгоритм подбора и оценки качества эталонных участков с анализом спектральных профилей классов обеспечил необходимую идентичность обучающих выборок на снимках временного ряда при автоматизированном дешифрировании исследуемой территории. Его применение обеспечивает

высокую разделимость и репрезентативность выборок при построении эталонов для классов «растительность на суше» и «пустоши» в аридных регионах.

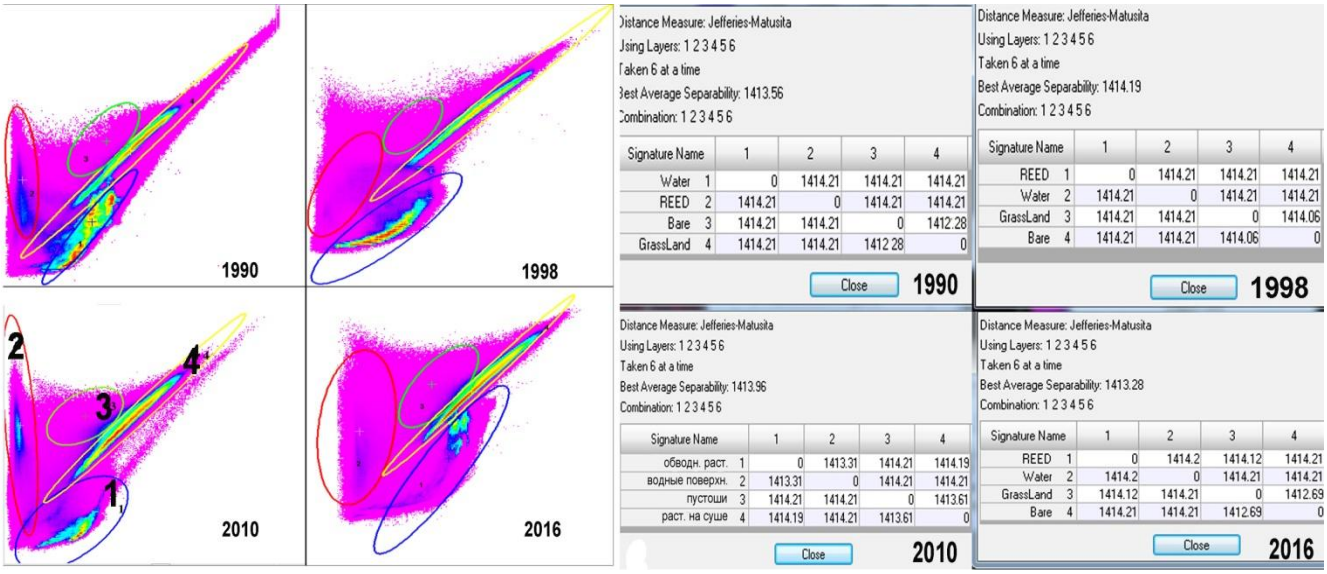

Рис. 6. Пример Оценки выборок на основе построенния эллипсов рассеяния между красным и БИК каналом и разделимость эталонов на основе рассояния Джеффриса-Матуситы (1-водные поверхн., 2- обводн. раст., 3- раст. на суше и 4- пустоши)

Для проведения классификации снимков алгоритм, реализующий метод максимального правдоподобия, был выбран на основе выделенных эталонных участков основных типов земель. Эталонные участки были сформированы для следующих классов объектов: водные поверхности; растительность на суше; пустоши, обводненная растительность.

Точность классифицированных изображений в данном исследовании контролировалась с использованием метода стратифицированной случайной выборки, включившей в общей сложности 100 точек. Общие точности классификации были получены в диапазоне от 86% до 98%. значение коэффициента Каппа варьировалось от 0,82 до 0,94 для всех изображений. Дополнительные оценки достоверности результатов дешифрирования были получены на основе анализа вегетационных индексов. На основе анализа вегетационного индекса SAVI, было рассчитано среднее покрытие растительностью в каждом классе для всех временных рядов по данному индексу.

Взаимосвязь между значениями SAVI и общей биомассой растительности описывается уравнением:

$$Y=179,3\times SAVI+24,89. \quad (1)$$

Точность линейной аппроксимации 1 в данном регионе $R^2=0,85$.

на основе линейной зависимости 1 было рассчитано среднее покрытие растительностью в каждом классе для всех временных рядов (Табл. 1).

Таблица 1. Средние значения сомкнутости растительности (%) в 1987–2016 гг.

Классы	Пустоши	Растительность на суше	Обводненная растительность
Сомкнутость	12-25%	30-50%	60-70%

Необходимо отметить, что полученные средние значения по идентичным классам на тестовых участках практически совпали. Это говорит о том, что выделенные классы типичны для данной территории и надежно разделяются на основе использованной методики классификации.

Как показывают результаты тематической обработки всех временных рядов по трем сезонам, после 2000 г. в большинстве случаев водные зеркала до конца гидрологического года не сохранились, особенно в последние шесть лет (рис. 7).

Также весной 2001 г. и 2004 г., аппаратура Landsat не зарегистрировала водные зеркала. По сути, в последние годы эти территории превратились в затапливаемые весенним половодьем и пересыхающие в течение лета и осени пустоши. Таким образом, динамичность объекта весьма высока.

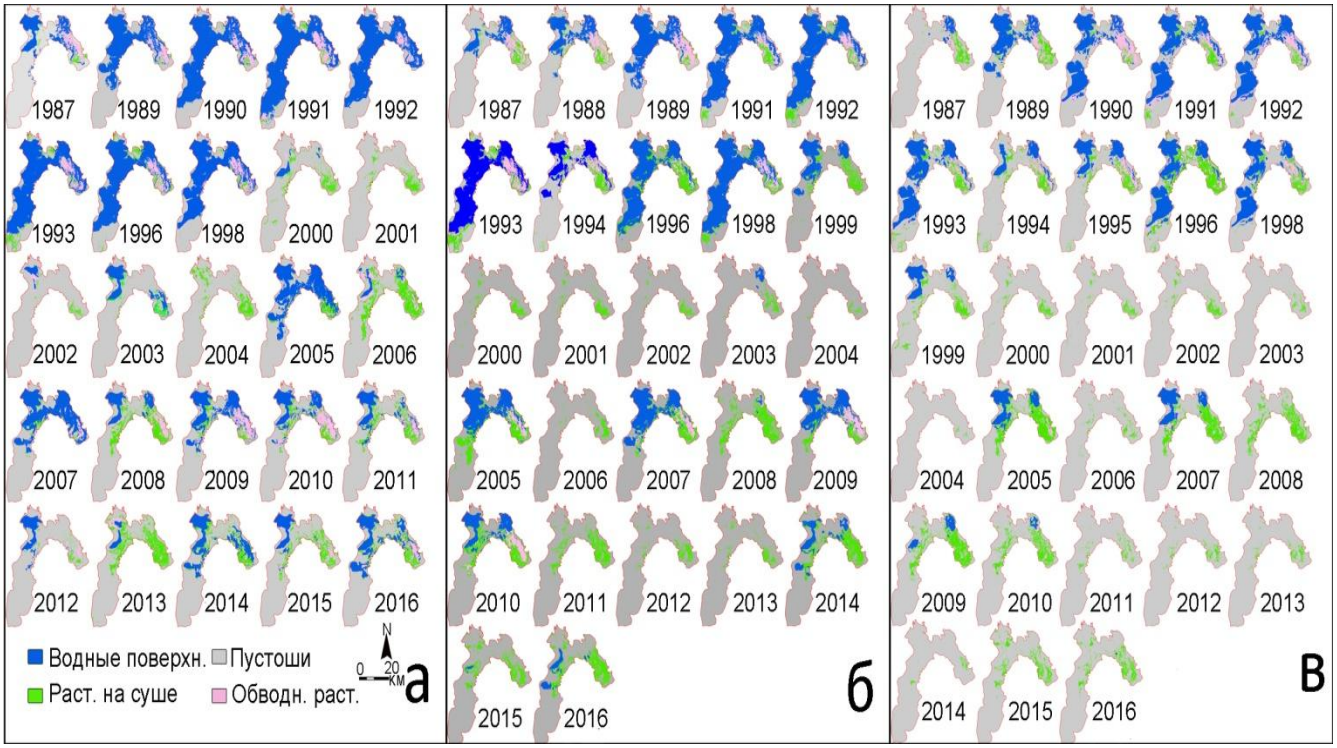

Рис. 7. Результаты дешифрирования снимков с 1987 по 2016 гг. территория водно-болотных угодий Хамун для весного сезона (а), летного сезонв (б) и осенего сезона (в)

Результаты показывают, что весной после паводков, площадь водных зеркал и растительности в донной части водно-болотных угодий увеличивается. Уменьшение осадков в течение лета, меньший приток воды из рек, особенно из реки Гильменд, 120-дневные ветры и интенсивное испарение являются основными причинами высыхание растительности и водных ресурсов. Кроме того, запас воды в водохранилище Чах-ниме с целью снабжения населения питьевой водой является одной из причин недостатка воды в водно-болотных угодьях.

Проведенные результаты исследований показывают, что многозональные снимки космического аппарата Landsat могут эффективно использоваться для создания временных рядов тематических карт земного покрова аридных экосистем с целью оценки их сезонной динамики. Полученные результаты позволяют оценить динамику типов земель исследуемого региона. Как видно из рисунков, в интервале 2000 – 2004 гг. наблюдалось существенное сокращение площадей растительности и водных ресурсов.

В четвертом разделе освещены количественные изменения по сезонам в типах земель на исследуемой территории, описана методика геоинформационного анализа результатов тематической обработки космических изображений. Так же рассматриваются социально-экономические последствия пересыхания водно-болотных угодий. Для характеристики изменений в типах земель использовано постклассификационное сравнение (ПКС).

Оценка изменений, произошедших за 30 летний период, дает возможность выявить длительные тенденции изменения в составе земель. Полученные результаты оценки изменений для разных сезонов по классам «водные поверхности» и «обводненная растительность» показали, что между весенним и осенним сезонами статистическая взаимосвязь существенно меньше, чем между весенним и летним. В указанные различия свой вклад вносят интенсивное испарение летом, уменьшение притока воды из рек и песчаные бури. Очевидно, что из-за наносов песка озера мелеют, и испарение на мелководье происходит быстрее.

Класс «растительность на суше» существенно изменяется в интервале весна-лето, для него связь в этот период меньше других классов, а в интервале лето-осень, наоборот, проявляется большая связь. Благодаря весенним наводнениям, травянистые растения очень быстро растут, а во время летних ветров не менее быстро высыхают. Летом сохраняются только многолетние растения, которые питаются от грунтовых вод. На состояние такой растительности весенние

наводнения влияют слабо. Результаты оценки изменений показали, что типы земель в районе исследования значительно изменились за последние 30 лет (Рис. 8).

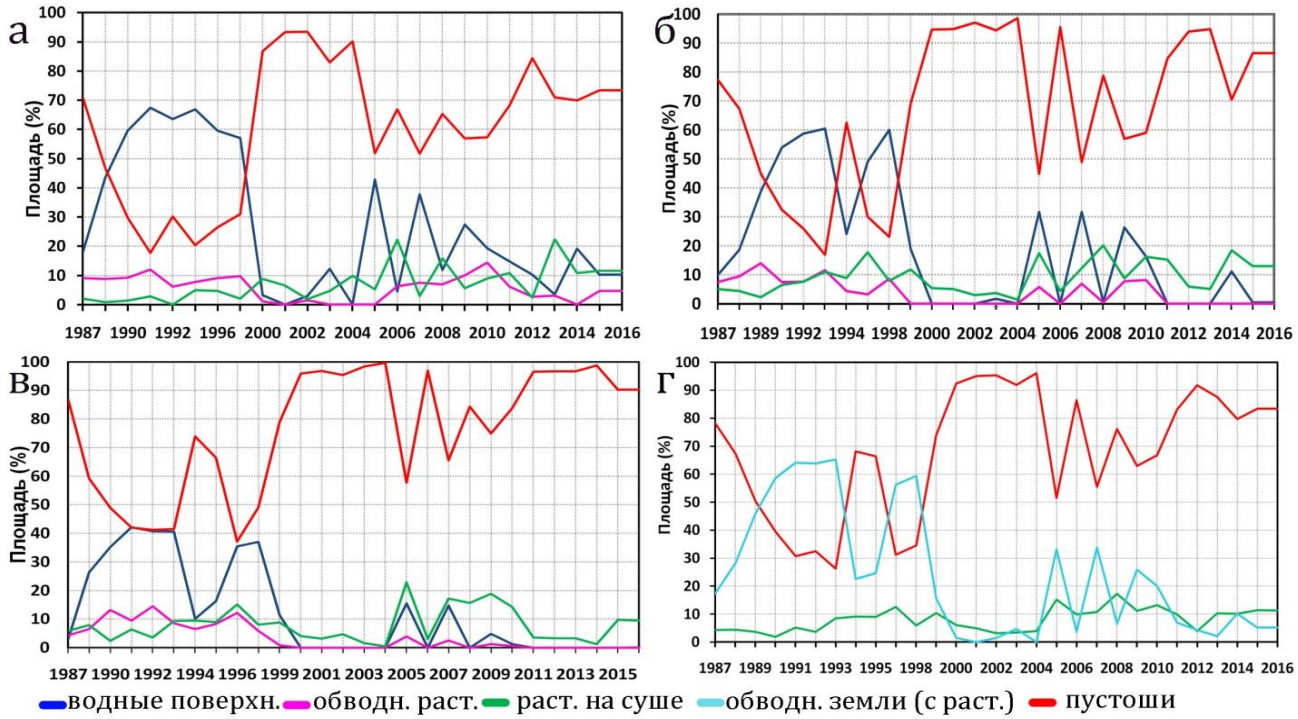

Рис. 8. Изменение (в процентах от общей площади) площадей типов земель на исследуемой территории в 1987-2016 гг. по данным за весенний (а), летний (б) и осенний (в) сезоны, а также среднегодовая интегральная оценка изменения по трем сезонам (г)

Изменения связаны с сокращением площади растительности и водных ресурсов и с увеличением площади, занятой пустошами. В интервале 2000 – 2005 гг. значительно сократилось количество водных ресурсов. Полученные результаты оценки изменений для разных сезонов по классам «водные поверхности» и «обводненная растительность» показали, что между весенним и осенним сезонами статистическая взаимосвязь существенно меньше, чем между весенним и летним. Кроме того, доля пустошей, как видно из сравнения результатов 1987 года, 2001 года (после засухи) и последних лет, может существенно изменяться, и связано, прежде всего, с изменением площади обводненных территорий. Наиболее хорошо это заметно по данным осеннего сезона. (Рис. 8.в).

Для оценки средних колебаний площадей, были построены графики, осредненные по трем сезонам (Рис. 8.г). Для того чтобы сравнить колебание классов, покрытых водой, с другими классами, «вода» и «обводненная

растительность» были объединены с получением класса «обводненные земли с растительностью». Приведенные результаты показывают, что растительность на суше в целом не очень сильно реагирует на колебания годичного притока воды и площадь под растительностью не самый лучший критерий анализа динамики типов земель в исследуемом регионе. Площадь под растительностью в течение исследуемого периода сильно не меняется.

Для характеристики количественных изменений в типах земель были созданы маски каждого из основных классов, которые были наложены на результат классификации за последующий сезон (Рис. 9).

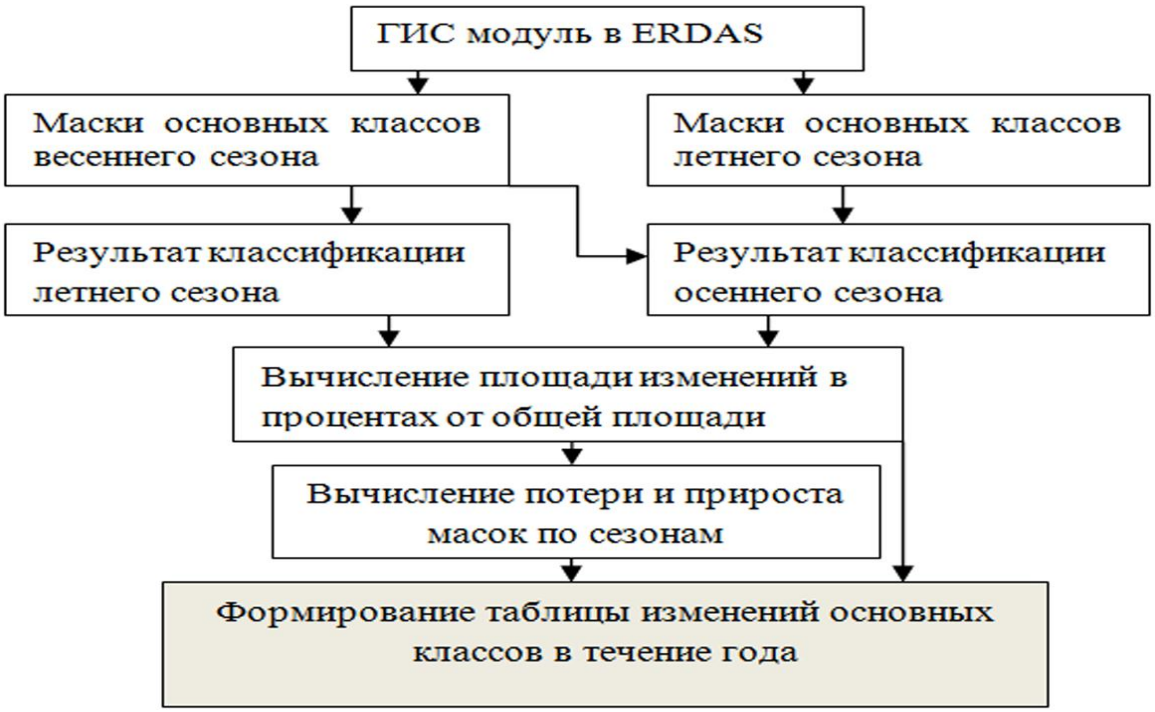

Рис. 9. Блок-схема методики выявления количественных изменений в типах земель на исследуемой территории

Данная методика позволила вычислить точное изменение доли каждого класса в течение гидрологического года. Полученные результаты наглядно показывают, что большая доля растительного покрова в течение изучаемого периода наблюдается весной 2006 и 2013 годов. Заметно преобразование этого класса в пустоши летом в данные годы. Это говорит о том, что в эти годы происходила сильная потеря влаги. Большая доля этого класса осенью наблюдается в 2008 г. (13 % от общей площади региона). Следует отметить, что в течение 2005 г., в результате выпадения большого количества осадков, произошли

«перезарядка» и частичное восстановление водно-болотных угодий и увеличение площади растительного покрова.

В результате наложения масок воды на данные последующих сезонов выявлено, что в интервале 1987–1998 гг. большой объем воды сохранялся в регионе до конца года. Это связно с увеличением притока рек, особенно реки Гильменд. После сильной засухи в 2000 г. в большинстве случаев в последующие годы в конце года водные зеркала полностью пересыхали, особенно в последние шесть лет. По сути, в последние годы эти территории превратились в затапливаемые весенним половодьем и пересыхающие в течение лета и осени. На основе выполненного анализа была формализована методика количественной оценки изменений в типах земель на аридных территориях.

Рассматривая результаты оценок изменений, можно отметить, что в очень сухие годы, например 2001 и 2004 г., на снимках Landsat даже весной не регистрировалась водная поверхность, и, соответственно, обводненная растительность. Также, по данным Landsat в интервалах 2000 – 2004 гг. и 2010 – 2016 гг. водные зеркала в районе существовали не полный год. Большую часть года в анализируемом районе они отсутствовали, как и обводненная растительность.

Согласно полученным результатам, сильные колебания всегда были отличительной характеристикой естественного гидрологического цикла района, в котором даже периоды малой воды играют важную экологическую роль. Серьезная опасность возникает, когда сухие периоды продолжаются необычно долго. Это не только угрожает экосистеме, но и ограничивает возможности населения вести нормальный образ жизни и добывать средства к существованию. Водно-болотные угодья Хамун обеспечивают возможность трудоустройства для 40,8% домохозяйств в области Систан.

Засуха и ветры являются двумя основными факторами, вызывающими пыльные бури. Эти факторы усугубляются физико-географическими условиями района вокруг озер, такие как слабая закрепленность и рыхлая структура донных отложений водно-болотных угодий.

В результате 30 летнего мониторинга на основе ДДЗ возможно сделать заключение о том, что пастбищные ресурсы ограничены донной территорией водно-болотных угодий и дельтами рек, где обеспечивается достаточное увлажнение. Это привело к перемещению животноводства в данные области.

Перевыпас усиливает ветровую эрозию и стимулирует распространение засухоустойчивых и инвазивных видов растений.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что самая значительная причина смены типов земель в исследуемом регионе в период с 1987 по 2016 годы - это колебания площади обводненных объектов, вызванные недостаточным притоком воды рек и характером климата. Можно сделать вывод, что наиболее репрезентативным сезоном для определения тенденций изменений в типах земель в исследуемом регионе, с учетом комплекса природных и антропогенных факторов, является осень, так как к моменту наступления данного сезона, на состоянии земель сказываются все природные факторы, в том числе летние засухи и пыльные бури.

Заключение

В исследовании содержится решение научной задачи оценки динамики экосистем аридных зон на основе автоматизированной обработки и геоинформационного анализа временных рядов космических снимков и изложены новые научно-обоснованные методические и технологические решения:

- методика автоматизированного дешифрирования разновременных данных дистанционного зондирования, обеспечивающая корректное сопоставление результатов автоматизированного дешифрирования на основе поддержания идентичности спектральных сигнатур выделяемых классов; разработанная методика обработки и анализа космических снимков позволила выполнить оценку динамики экосистем региона с высокой степень достоверности, что подтверждается наземными обследованиями и результатами исследований, проведенными различными авторами за последние 30 лет;

- методика оверлейного геинформационного анализа результатов автоматизированного дешифрирования и количественные оценки изменений основных типов земель аридных зон на примере бассейна р.Систан с учетом влияния сезонных факторов;

- полученные по результатам выполненного анализа рекомендации по проведению дистанционного мониторинга аридных зон, а именно:

1) анализ долговременных изменений экосистем территории с высокой сезонной динамикой требует ее мониторинга в течение всего годичного цикла для определения сезона, наиболее полно отражающего воздействие всех природно-климатических факторов;

2) отсутствие возможности валидации результатов дешифрирования ретроспективных снимков по наземным данным требует определения перечня классов, надежно разделяющихся по спектральным сигнатурам на всех снимках временного ряда; это, в свою очередь, требует приведения всех снимков к единой яркостной шкале путем атмосферной коррекции и контроля положения классов в пространстве спектральных сигнатур при подготовке обучающих данных;

3) при дальнейшем мониторинге водно-болотных угодий бассейна реки Систан в качестве наиболее репрезентативного показателя динамики целесообразно использовать общую долю площади обводненных земель в осенний период, наиболее полно отражающую воздействие всех климатических факторов годичного цикла.

Выводы

Из проведенного по разработанной методике анализа динамики изучаемой территории получены следующие выводы:

1. Выявлено, что после засухи в 2000 г. и в последующие годы, экосистема региона существенно изменяется и существует сильная тенденция к опустыниванию, весенний приток воды не оказывал значительного влияния на тренд к опустыниванию.
2. Согласно полученным результатам, значительная часть воды, накопленной весной, испаряется к концу гидрологического сезона, увеличение населения в бассейне Систан, рост спроса на воду, постройка плотин, развитие сельского хозяйства в Афганистане, запас воды в водохранилищах являются основными причинами, ведущими к изменениям в гидрологических циклах и к пересыханию озер.
3. На основе полученных результатов показано, что наиболее репрезентативным показателем, характеризующим изменения экосистем в районе исследования, являются площади обводненных территорий.
4. На основе полученных результатов по сезонам года показано, что наиболее репрезентативным сезоном для определения тенденций динамических изменений, с учетом комплекса природных и антропогенных факторов, является осень, т.к. данный сезон состояние экосистемы отражает влияние всех природных факторов за год, в том числе летние засухи и пыльные бури.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Р.С. Харазми, Л.Н. Чабан. Анализ динамики экосистем бассейна Систан по результатам автоматизированной обработки космических мультиспектральных снимков // Изв. Вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка».- 2015.- № 4.-С. 94-100.

2. Р. Харазми, Е.А. Паниди, М. Каркон Варносфадерани. Оценка динамики аридных экосистем на основе временных рядов космических снимков// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.- 2016.- Т. 13.- № 5.- С. 214-223.

3. Р. Харазми, Е.А. Паниди, Л.Н. Чабан. Оценка динамики аридных экосистем по результатам автоматизированной обработки серий мультиспектральных спутниковых снимков// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.- 2017.- Т. 14.- № 3.- С. 196–205

4. Р.Харазми, Л.Н. Чабан, М. Каркон Варносфадерании, Е. А. Паниди, Е.М. Митрофанов. Оценка точности различных методов контролируемой классификации в аридных территорий// Изв. Вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка».- 2017.- № 5.- С. 106-110.

5. М.М.Каркон Варносфадерани, Р.С.Харазми, Д.А.Шаповалов, Е.М. Митрофанов. Оценка точности визуального дешифрирования растительного покрова на основе вегетативных индексов// Изв. Вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка».- 2016- № 4- С. 90-93.

В прочих научных изданиях:

6. Varnosfaderani MK, Kharazmi R, Samani AN, Rahdari MR, Matinkhah SH, Aslinezhad N. Distribution changes of woody plants in Western Iran as monitored by remote sensing and geographical information system: a case study of Zagros forest// Journal of Forestry Research.- 2017.- vol. 28(1).- pp. 145–153.

7. Nasrolah Aslinejad, Abuzar Nasiri, Mansur karkon, Hamid Alipur, Rasoul Kharazmi, 2014. Locating suitable areas for rain water harvesting// Elixir international journal (Remote Sensing).- 2014.- vol. 75.- pp. 27616-27619.

8. Nasrolah Aslinejad, Ahmad Pahlavanravi, Nasrollah Basirani, Mahdiye Ebrahimi, Rasoul Kharazmi, Assessment of land degradation and desertification with use of IMDPA model (case study: Chah-hashem plain. Iran)// International Journal of advanced biological and biomedical research (IJABBR).- 2014.- vol. 2 (10).- pp. 2644-2650.