

*На правах рукописи*

**ТИМОФЕЕВ Виталий Григорьевич**

**ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОПУСТИМОГО  
УРОВНЯ МЕЛИОРАТИВНОГО ОСВОЕНИЯ ЛАНДШАФТОВ**

Специальность: **06.01.02** – Мелиорация, рекультивация и охрана земель

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург  
2007

Работа выполнена на кафедре автоматизации управления войсками  
Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского

**Научный руководитель:** доктор географических наук, профессор  
**Осипов Георгий Константинович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Арефьев Николай Викторович**

кандидат географических наук  
**Субботин Сергей Николаевич**

**Ведущая организация:** Северо-западный филиал ФГУП  
«Госземкадастръёмка»

Защита состоится 23 октября 2007 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, гидрокорпус 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета

Орлов В.Т.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Одним из направлений преобразования природной среды является ее мелиоративное освоение, которое представляет собой изменение природных ландшафтов в интересах улучшения условий ведения сельского, лесного и других видов хозяйства или повышения комфортности проживания людей. Мелиоративные мероприятия обеспечивают сохранение и повышение плодородия земель, создают необходимые условия для вовлечения в хозяйственный оборот неиспользуемых и малопродуктивных земель, а также способствуют формированию рациональной структуры земельных угодий. Однако, в свою очередь, они приводят к неизбежному упрощению видового разнообразия ландшафтов, изменению режимов их функционирования и снижению их устойчивости. Недоучет ландшафтных особенностей территории при ее мелиоративном освоении вызывает развитие негативных экологических процессов. Например, за период с 1991 по 2005 годы по этой причине площадь мелиорированных земель сократилась на 4,28 млн. га, а площадь земель, находящихся в неудовлетворительном состоянии, достигла 3,56 млн. га. (Фомкин И.В.). Одной из причин возникновения ошибок при создании природно-мелиоративных систем является несовершенство информационного обеспечения процесса проектирования.

Исходя из вышеизложенного, к важнейшим научно-практическим задачам мелиоративной деятельности следует отнести совершенствование методов и средств информационной поддержки принятия решений по созданию природно-мелиоративных систем.

Вопросам информационного обеспечения мелиоративного освоения территории посвящено множество отечественных и зарубежных работ, отметим лишь некоторые из них (Аношко В.С., Брилевский М.Н., Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К., Гарманов В.В., Осипов А.Г., Зеляковская В.М., Михно В.Б., Николаев В.А., Мееровский А.С., Якушева В.И., Демидов А.Н, Самойленко В.В.). Подавляющее большинство этих работ ориентированно на получение информации о природных объектах методами полевого обследования, в то время как одним из наиболее перспективных направлений изучения природных систем является их дистанционное зондирование.

В настоящее время наряду с традиционными средствами дистанционного зондирования (космическими летательными аппаратами, самолетами, вертолетами и т. д.) широкое внедрение получают беспилотные летательные аппараты, позволяющие с минимальными материальными и трудовыми затратами получать информацию, необходимую для принятия решений по созданию природно-антропогенных систем, в том числе природно-мелиоративных. Эти аппараты получили название дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА), их основными достоинствами по сравнению с традиционными средствами зондирования являются высокая разрешающая способность при простоте съемочной аппаратуры и возможность оперативного сбора данных. Однако следует отметить, что широкое внедрение ДПЛА в практику

природопользования ограничивается отсутствием научно-методических разработок по их применению.

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования выступает географический ландшафт – генетически однородный природно-территориальный комплекс, характеризующийся относительным единством слагающих его природных компонентов.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является разработка научно-методических основ определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта с использованием ДПЛА. При этом под мелиоративным освоением ландшафта мы понимаем проведение мелиоративных мероприятий по осушению территории, ликвидации закустаренности и мелкоконтурности угодий.

**Методология исследования.** В основу исследования заложены подходы отечественных и зарубежных ученых к созданию систем информационной поддержки принятия решений в области безопасности природопользования.

В диссертации применялись следующие методы исследований: монографический, математический, картографический и экспертных оценок.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является совершенствование методов информационного обеспечения принятия решений по созданию экологически безопасных природно-мелиоративных систем.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- сформулировать принципы, закладываемые в основу эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов при создании природно-мелиоративных систем;
- разработать метод получения исходных данных для оценки биоразнообразия ландшафта с использованием ДПЛА;
- разработать метод формирования базы знаний для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта;
- разработать метод автоматизированного определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования;
- создать методику эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов, реализующую разработанные методы;
- апробировать созданную методику на модельной территории.

**Обоснованность и достоверность выводов, результатов.** Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационном исследовании, достигается использованием апробированной методологии эколого-географической оценки территории, применением современных методов изучения природных объектов, а также практическим опытом по информационному обеспечению процесса проектирования природно-мелиоративных систем и непротиворечивостью полученных результатов выводам, содержащихся в работах следующих авторов: Аношко В.С., Яцухно В.М., Ягомяги Ю.Э.

**Научная новизна.** В ходе диссертационного исследования впервые:

- определен и обоснован перечень показателей, участвующих в оценке экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта;
- разработан метод получения исходных данных для оценки биоразнообразия ландшафта с использованием ДПЛА;
- разработан метод формирования базы знаний для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта;
- разработан метод автоматизированного определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования;
- создана методика эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов, реализующая разработанные методы.

**Положения, выносимые на защиту:**

- метод получения исходных данных для оценки биоразнообразия ландшафта с использованием ДПЛА;
- метод формирования базы знаний для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта;
- метод автоматизированного определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования.

**Практическая значимость и внедрение.** Практическая значимость заключается в том, что созданная методика эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов, позволит повысить качество информационного обеспечения процесса проектирования природно-мелиоративных систем. Разработанная методика внедрена в практику в качестве составной части «Территориальной информационно-аналитической системы» для муниципального образования «Приозерский район Ленинградской области» (Муниципальный контракт № 06/2006 от 22.12.2006г.), что подтверждено актом о внедрении, полученного от ЗАО «Институт телекоммуникаций», ответственного за выполнение контракта.

**Апробация результатов работы.** Результаты выполненных исследований были представлены на следующих научно-практических конференциях: «Научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП», посвященной 60-летию предприятия 10-12 октября 2006г.» (М, 2006), научно-практической конференции «Санкт-Петербург и Ленинградская область в условиях глобализирующегося мира» (СПб, 2006), Третьей военно-научной конференции Космических войск (ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007). Методологические и методические аспекты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научных семинарах факультета автоматизированных систем управления и связи ВКА им. А.Ф. Можайского (2006-2007), инженерно-строительного факультета СПбГПУ (2007). На семинарах автором лично освещались современные тенденции в совершенствовании информационного обеспечения управленческой мелиоративной деятельности, рассматривались подходы к использованию данных дистанционного зондирования к определению количественных характеристик для выполнения эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов, предлагались

технические и технологические решения по получению и обработке информации о природных объектах.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано три работы.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, пяти приложений, списка литературы, включающего 262 наименования. Общий объем диссертации 144 страницы машинописного текста, 20 рисунков, 5 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

Антропогенное освоение территории должно осуществляться с учетом способности природных ландшафтов выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения механизмов саморегуляции, обеспечивающих устойчивость ландшафтов к антропогенным нагрузкам. Согласно работам многих отечественных и зарубежных авторов (Сочава В.Б., Арманд Д.Л., Арманд А.Д., Аношко В.С., Залетаев В.С., Ягомяги Ю.Э., Уиттекер Р.Х., Clements F.E., Hougland B.W., Collins S.L.) к важнейшим факторам, обуславливающим устойчивость ландшафтов, относится их видовое разнообразие. Следовательно, при проектировании природно-антропогенных систем, в том числе и природно-мелиоративных, должен определяться экологически допустимый уровень освоения ландшафтов, не нарушающий свойственного им видового разнообразия. При этом следует учитывать, что сложность видового разнообразия ландшафтов снижает их устойчивость к антропогенному освоению.

В качестве индикаторов видового разнообразия ландшафтов выступают *эктоны* - переходные полосы между физиономически отличимыми основными растительными сообществами (ОРС). Они оказывают компенсирующее влияние на естественное восстановление биогеоценозов. Видовое разнообразие ландшафтов обусловлено не только количеством экотонов расположенных в их пределах, но и контрастностью основных растительных сообществ, формирующих экотоны. Однако, вышеперечисленные и другие авторы, оценивают видовое разнообразие на основе полевых исследований. Разработанный нами подход отличается от традиционного тем, что, вместо полевых исследований, в нем используется метод дистанционного зондирования территории с применением ДПЛА и математического аппарата, позволяющий в сочетании с базой знаний, получать данные об экологически допустимом уровне мелиоративного освоения ландшафтов. Учитывая новизну этого подхода, автором были разработаны и заложены в основу диссертационного исследования следующие принципы:

- *принцип системности.* Обеспечивает рассмотрение каждого фактора, участвующего в оценке не изолированно, а во взаимодействии с другими факторами. Он позволяет выявлять особенности ландшафта не только аналитическим, но и логическим путем. С принципом системности тесно связан принцип структурной взаимосвязи.

- *принцип «структурной взаимосвязи».* Обеспечивает рассмотрение окружающего мира в виде организованной структуры взаимодействующих природных объектов. Он позволяет использовать при проведении исследования метод внутриландшафтной

экстраполяции, т. е. распространить дешифровочные признаки значимых объектов, выделенных на ключевых участках, на исследуемый ландшафт в целом, а также производить типизацию ландшафтов по географическим условиям.

- *принцип масштабного соответствия.* Обеспечивает соответствие между пространственной дискретизацией результатов оценки и площадью исследуемого объекта. Он позволяет соблюсти одинаковую детальность оценки в пределах всей изучаемой территории.

- *принцип пространственной топологичности.* Обеспечивает рассмотрение метрически взаимосвязанных друг с другом компонентов природной среды в виде фрагментов единого географического пространства. Он позволяет производить распознавание образов природных объектов с их последующим синтезом в объектовые топологические системы.

- *принцип континуальности.* Обеспечивает изучение в пределах ландшафта всех земель, потенциально пригодных для мелиоративного освоения, за исключением тех, которые в силу невозможности их мелиоративного освоения исключаются из рассмотрения (например, водные акватории, застроенные и промышленно-освоенные территории и т.д.).

- *принцип единства оценки.* Обеспечивает проведение оценочных работ по одним и тем же показателям (их виду и числу), имеющим единые квалиметрические шкалы (оценочные градации). Он позволяет сравнивать результаты оценки не только в пределах ландшафта, но и в пределах изучаемого региона.

- *принцип эмерджентности.* Обеспечивает учет свойств, присущих как отдельным компонентам ландшафта, так и ландшафту в целом.

- *принцип «критериальной адекватности оценки».* Обеспечивает адекватное представление данных в соответствии с выбранными моделями и методами обработки информации. Он позволяет выполнять сравнение ландшафтов между собой по критерию биоразнообразия и на этой основе определить экологически допустимый уровень их мелиоративного освоения.

Вышеперечисленные принципы легли в основу методики эколого-географической оценки допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов, основными блоками которой являются: получение исходных данных для оценки биоразнообразия ландшафта с использованием ДПЛА, формирование базы знаний для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта, автоматизированное определение экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования. Для реализации каждого блока автором были разработаны методы, которые рассмотрены ниже.

**Метод получения исходных данных для оценки биоразнообразия ландшафта с использованием ДПЛА.** Новизна разработанного метода состоит в использовании ДПЛА для оценки биоразнообразия ландшафтов и создании математического аппарата, обеспечивающего при минимальных материальных и временных затратах необходимую

точность получения исходных данных. Он включает в себя планирование летно-съёмочных работ, их выполнение и обработку результатов аэрофотосъёмки.

В состав характеристик, необходимых для обеспечения полетов ДПЛА, входят: высота фотографирования; базис съёмки; расстояние между маршрутами; максимальное время выдержки; интервал между экспозициями; количество снимков в маршруте; количество маршрутов; общее количество снимков. Для их определения используются зависимости, приведенные в работе (Смирнов Л.Е.).

Для выполнения летно-съёмочных работ выбирается вегетационный период развития растительного покрова, когда растительность хорошо дешифрируется. Летно-съёмочные работы выполняются площадным методом путем прокладки прямолинейных параллельных маршрутов. Перекрытие снимков между собой (поперечное) должно составлять не менее 60%, а между маршрутами (продольное) – 30%. Выполнение данного условия гарантирует сплошную съёмку местности без разрывов.

Для повышения дешифровочных свойств аэрофотоснимков съёмка выполняется в двух зонах спектра – красной (длина волны  $\lambda_{\text{RED}} = 0.68-0.7\text{мкм}$ ) и ближней инфракрасной (длина волны  $\lambda_{\text{NIR}} = 0.74-1.1\text{мкм}$ ).

Обработка результатов аэрофотосъёмки включает в себя фотограмметрические работы по трансформированию и плановой привязке полученных аэрофотосъёмочных материалов. Их необходимость продиктована тем, что изображение местности на аэрофотоснимках геометрически искажено.

Съёмка местности с применением ДПЛА имеет ряд особенностей, отличающих ее от традиционных способов съёмки, которые оказывают непосредственное влияние на методы обработки фотоизображений. Во-первых, в виду того, что съёмка производится с небольшой высоты (около 500 м) появляется возможность не учитывать искажения, вызванные кривизной Земли и рефракцией воздушных масс. Во-вторых, при трансформировании аэрофотоснимков необходим учет влияния рельефа на искажение фотоизображений, так как высота полета ДПЛА соизмерима с превышениями местности над уровнем моря.

Трансформирование аэрофотоснимков предлагается выполнять аналитическим методом, основанным на использовании коллинеарных уравнений, строго описывающих закон построения изображения для одиночного снимка в центральной проекции. Рассмотрим авторский подход к трансформированию аэрофотоснимков, полученных с использованием ДПЛА с учетом искажений, вызванных влиянием рельефа местности.

Преобразуем координаты точек исходного аэрофотоснимка  $(x, y, m)$  в трансформированные  $(x^0, y^0, m)$  с учетом фокусного расстояния фотокамеры  $(f, m)$ , элементов внешнего ориентирования фотокамеры ( $\alpha$  – угла наклона,  $\omega$  – поперечного угла наклона,  $\chi$  – угла поворота), выраженных в градусах (Лобанов А.Н.):

$$\begin{cases} x^0 = -f[a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f / c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f] \\ y^0 = -f[b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f / c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f] \end{cases} \quad (1)$$



где:

$$a_1 = \cos \alpha \cdot \cos \chi - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \chi; \quad a_2 = -\cos \alpha \cdot \sin \chi - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \chi; \quad (2, 3)$$

$$a_3 = -\sin \alpha \cdot \cos \omega; \quad b_1 = \cos \omega \cdot \sin \chi; \quad b_2 = \cos \omega \cdot \cos \chi; \quad (4, 5, 6)$$

$$b_3 = -\sin \omega; \quad c_1 = \sin \alpha \cdot \cos \chi + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \chi; \quad (7, 8)$$

$$c_2 = -\sin \alpha \cdot \sin \chi - \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \chi; \quad c_3 = \cos \alpha \cdot \cos \omega. \quad (9, 10)$$

Предположим, что высота фотографирования ( $H$ , м) измерена навигационной системой ДПЛА в точке местности с координатами ( $X_0$ ,  $Y_0$ , м). Для определения высоты рельефа ( $h$ , м) в этой точке используем цифровую матрицу рельефа (ЦМР), сформированную по электронной карте (ЭК). После этого откорректируем координаты точек аэрофотоснимка с учетом влияния рельефа по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} x^0 = (1 - h/H)f \cdot x; \\ y^0 = (1 - h/H)f \cdot y, \end{cases} \quad \text{где:} \quad \begin{cases} x = f/H(X - X_0) - x_0^0; \\ y = f/H(Y - Y_0) - y_0^0. \end{cases} \quad (11, 12)$$

где:  $x_0^0, y_0^0$  – координаты главной точки аэрофотоснимка (м).

Объединение аэрофотоснимков в единое растровое геоинформационное пространство осуществляется по координатам угловых точек.

Если степень мелиоративного освоения ландшафта (отношение площади мелиорированной территории к общей площади, %) определяется с точностью 1% (Аношко В.С.), то площади ландшафтов и экотонов должны определяться с такой же точностью. Следовательно, на 1 га определяемой площади погрешность измерения не должна превышать 100 кв. м или на 100 м определяемого расстояния – 1м.

Построим математическую модель определения относительной ошибки измерения расстояний по аэрофотоснимкам. Будем считать, что параметры, входящие в зависимости (1-12), не коррелируют между собой, либо коэффициенты их корреляции очень малы, т.е. ошибки измерения расстояний на аэрофотоснимках в продольном и поперечном направлениях равны. В качестве начальных и конечных точек расстояний ( $b_i$ ) будем рассматривать центральные координаты точек трансформированных снимков, слагающих фотосхему. Отрезок  $b_i$  содержит искажения, обусловленные ошибками определения линейных ( $m_{X_0Y_0}$ , м), угловых ( $m_{\alpha\omega\chi}$ , м) элементов внешнего ориентирования фотокамеры, высоты фотографирования ( $m_H$ , м), измеренной навигационной системой ДПЛА, рельефа местности ( $m_h$ , м). Примем, что ошибки определения указанных параметров подчиняются нормальному закону распределения. Тогда средняя квадратическая ошибка (СКО) расстояния на фотосхеме ( $m_{Ln}$ ) будет определяться следующим образом:

$$m_{Ln} = m_b \sqrt{n}, \quad (13)$$

где:  $n$  – количество снимков, слагающих фотосхему;  $m_b$  – СКО отрезка  $b_i$  (м), рассчитываемое по следующей зависимости:

$$m_b = \sqrt{2(2m_{X_0Y_0}^2 + m_H^2 + m_h^2 + 3m_{\alpha\omega\chi}^2)}. \quad (14)$$

Для нахождения величин  $m_{X_0Y_0}$ ,  $m_{\alpha\omega\chi}$ ,  $m_H$ ,  $m_h$ , входящих в зависимость (14), выполним дифференцирование (1, 11, 12) по переменным  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\chi$ ,  $H$ . После перехода к

средним квадратическим ошибкам путем разложения полученных в результате дифференцирования зависимостей в ряд Тейлора и исключения членов, составляющих более чем первый порядок малости, получим:

$$m_{\alpha\omega\chi} = r^2 \cdot \delta_{\alpha\omega\chi} / f; \quad m_{X_0Y_0} = r \cdot \delta_{XY} / H; \quad (15, 16)$$

$$m_H = r \cdot \delta_H / H; \quad m_h = \delta_{MTW} \cdot r / H, \quad (17, 18)$$

где:  $r$  – радиус-вектор, соединяющий точку нулевых искажений (в нашем случае, – главную точку фотоснимка) с точками наибольших искажений фотоснимка (в нашем случае, – с точками окружности радиуса  $r = b/2$ ) (м);  $\delta_{\alpha\omega\chi}$  – погрешность измерения угловых элементов внешнего ориентирования фотокамеры (рад);  $\delta_{XY}$  – погрешность определения линейных элементов внешнего ориентирования фотокамеры (м);  $\delta_H$  – погрешность определения высоты фотографирования (м);  $\delta_{MTW}$  – погрешность определения высоты рельефа по ЦМР (м).

Параметры  $m_{X_0Y_0}$ ,  $m_H$ ,  $m_{\alpha\omega\chi}$  схожи по физическому смыслу и определяются техническими характеристиками систем навигации и ориентации ДПЛА. Для расчета СКО примем следующие значения параметров:  $H = 500$  м;  $f = 100$  мм;  $r = 50$  мм;  $b = 100$  мм;  $\delta_{XY} = \delta_H = 3$  м;  $\delta_{\alpha\omega\chi} = 0.02$  рад;  $n = 4$ ,  $L = 100$  м. Если для формирования ЦМР применена топографическая ЭК масштаба 1:100 000, то максимальная погрешность определения высот для равнинных пересеченных и всхолмленных районов  $\delta_{MTW} = 9$  м. Исходя из расчетов, значение относительной ошибки измерения расстояния составит  $m_b \cdot L / b \cdot \sqrt{n} = 0.82$  м на 100 м, что не превышает заданной погрешности.

**Метод формирования базы знаний для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта.** В основу формирования базы знаний заложен объектно-ориентированный подход, рис. 1, который реализует сущности трех видов: 1) «Основные растительные сообщества, формирующие экотон – нормализованный разностный вегетационный индекс (НРВИ)»; 2) «Эталонный ландшафт – параметры, характеризующие биоразнообразие»; 3) «Контрастность экотонов». Записи в этих отношениях представляют собой объекты базы знаний. Каждый объект имеет уникальный идентификатор (на схеме выделен подчеркиванием). Методы обработки атрибутов ( $Q_{etalon}^j$ ,  $P_{etalon}^j$ ,  $R_{NDVI}^i$ ,  $\Delta R_{NDVI}^i$ ,  $\alpha_{SAVI}$ ) являются закрытыми (инкапсулированными). Кратко рассмотрим подходы к определению объектов базы знаний.

Первой составляющей базы знаний являются НРВИ основных типов растительных сообществ (ОРС), которые определяются по следующей зависимости (F. Baret, G. Guyot):

$$R_{NDVI} = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}), \quad (19)$$

где:  $R_{RED}$ ,  $R_{NIR}$  – значения интенсивности фототона элементов изображения, соответствующих отраженному растительностью света в красной и ближней инфракрасной областях спектра.

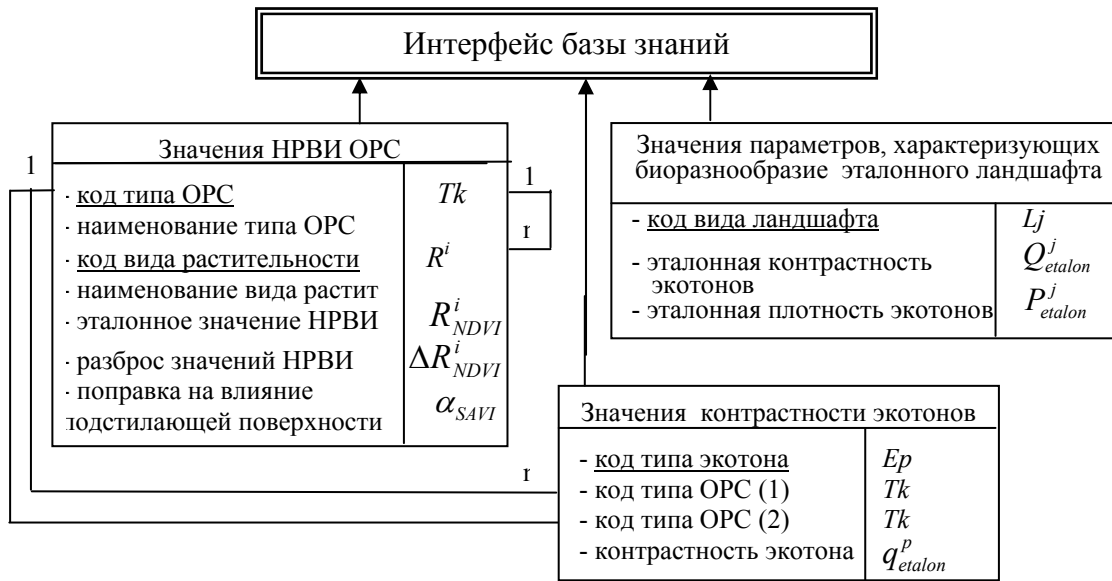


Рис. 1. Схема базы знаний.

(символами «1» и «n» обозначены связи типа «один ко многим», ОРС – основные растительные сообщества)

Работа по определению индексов начинается с выбора «ключевых» участков, в пределах которых в интерактивном режиме дешифрируются все типы ОРС, характерные для изучаемого региона. Затем для каждого типа определяется эталонное значение признака путем усреднения полученных результатов, и устанавливаются интервалы их разброса по формулам:

$$R_{NDVI_0}^i = (1/K) \sum_{k=1}^K R_{NDVI,k}^i; \quad \Delta R_{NDVI}^i = \sqrt{[1/(K-1)] \sum_{k=1}^K (R_{NDVI,k}^i - R_{NDVI_0}^i)^2}, \quad (20, 21)$$

где:  $R_{NDVI_0}^i$  - среднее из выборки  $K$  значений для  $i$ -го изучаемого ОРС по заданному контуру, при  $k = 1 \dots K$ .;  $\Delta R_{NDVI}^i$  - значение разброса НРВИ для  $i$ -го изучаемого ОРС.

Критерием правильности определения эталонных значений признаков является показатель ( $\chi$ ), характеризующий достоверность их выборки:

$$\chi = N_m / N, \quad (22)$$

где:  $N_m$  – количество правильно отдешифрованных объектов;  $N$  – общее количество объектов.

Показатель ( $\chi$ ) должен превышать значение 0.75. В противном случае выполняется анализ ошибок (эмиссии – ошибочно отброшенных объектов или комиссии – ошибочно принятых), повлиявших на достоверность выборки. Повышение показателя достигается за счет усиления контрастности снимков или введением поправок в формулу (19) при расчете НРВИ. Выбор оптимального решения в этом случае предлагается осуществлять путем логического анализа распределения значений НРВИ и их допустимых разбросов.

Выполнение этого анализа и выбор правила повышения достоверности возлагается на математический аппарат базы знаний. Результатом работ являются упорядоченные по основным растительным сообществам значения НРВИ в соответствии со следующей зависимостью:

$$T \cap R_{NDVI} \neq \emptyset, T_k \in T, R_{NDVI}^i \in R_{NDVI} \text{ при } i = 1 \dots n, k = 1 \dots m, \quad (23)$$

где:  $T_k$  – тип  $k$ -го ОРС;  $R_{NDVI}^i$  – эталонное значение НРВИ  $i$ -го ОРС;  $T$  – множество ОРС;  $R_{NDVI}$  – множество эталонных значений НРВИ;  $n$  – количество эталонных значений НРВИ;  $m$  – количество типов ОРС.

Новизна разработанного метода заключается в том, что в интерфейс базы знаний введены логические операции, обеспечивающие автоматизированное управление эталонированием НРВИ. Индикатором необходимости управления является значение показателя достоверности выборки ниже 0.75, что может быть обусловлено двумя факторами: 1) отсутствием резких различий между основными типами растительных сообществ; 2) влиянием подстилающей поверхности на показатель НРВИ. (Уиттекер Р.Х., П. Кронберг, Huete A.R.). Для устранения действия этих факторов, предлагается алгоритм коррекции вегетационного индекса, представленный на рис. 3.

Кратко рассмотрим работу основных блоков алгоритма. В блоке 1 выполняется анализ показателя достоверности. В случае достижения им значения ниже 0.75, осуществляется переход к блоку 3, в котором для интервалов  $R_i$ , определенных максимальным и минимальным значениями смежных НРВИ и отсортированных в порядке их возрастания, рассчитывается следующее соотношение:

$$[R_i \cap R_{i+1} = \emptyset] \vee [(R_{NDVI}^{i+1} - \Delta R_{NDVI}^{i+1} / 2) - (R_{NDVI}^i + \Delta R_{NDVI}^i / 2) \geq \Delta R], \quad (24)$$

где:  $\Delta R$  – наименьшее из всех значений  $\Delta R_{NDVI}^i$ , определенных в отношении «Значения НРВИ ОРС».

Невыполнение условия (24) хотя бы для одного из членов выражения свидетельствует об отсутствии резких различий между типами ОРС (блок 4). При необходимости, выполняется устранение размытости границ (блок 8) путем корректировки НРВИ поправкой, учитывающей влияние подстилающей поверхности ( $\alpha_{SAVI}$ ). Откорректированный НРВИ рассчитывается по следующей зависимости (Huete A.R.):

$$R_{SAVI} = (1/1 + \alpha_{SAVI}) \cdot (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + \alpha_{SAVI}) \quad (25)$$

Расчет поправки  $\alpha_{SAVI}$  выполняется итерационным способом с шагом 0.1 в интервале от 0.1 до 1.0. При достижении удовлетворительного значения показателя достоверности, расчет поправки заканчивается, откорректированные значения НРВИ записываются в базу знаний (блок 7) и работа алгоритма прекращается. В противном случае осуществляется расчет диапазона НРВИ ( $\delta_{NDVI}$ ) для ОРС (блок 5) по зависимости:

$$\delta_{NDVI} = \sqrt{[1/(n-1)] \sum_{i=1}^n (R_{NDVI}^i - R_{NDVI})^2}, \quad \text{где: } R_{NDVI} = (1/n) \sum_{i=1}^n R_{NDVI}^i. \quad (26, 27)$$

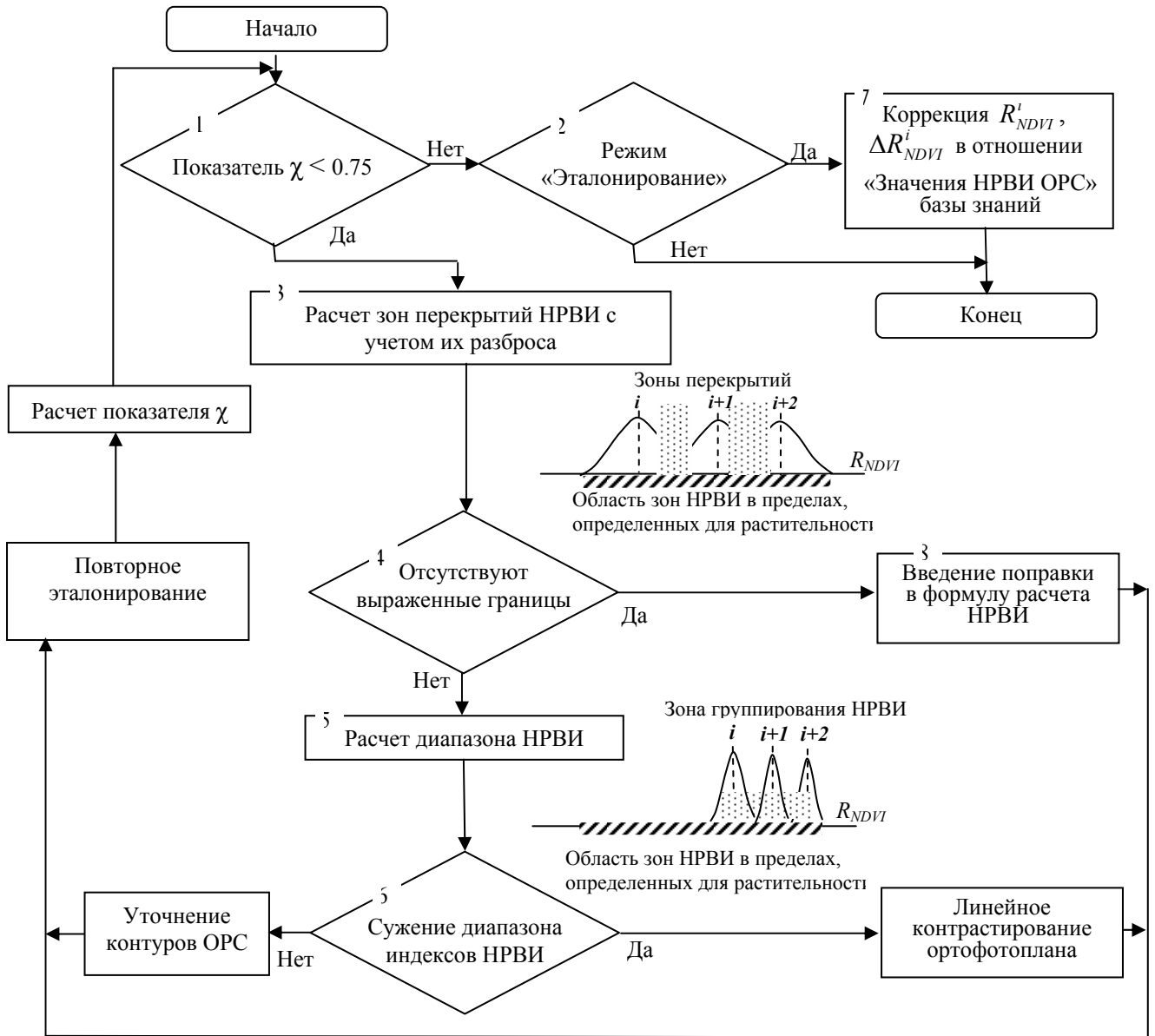


Рис. 3. Структурная схема алгоритма коррекции вегетационного индекса (пронумерованные блоки являются частью интерфейса базы знаний)

В блоке 6 проверяется выполнение следующего условия:  $\delta_{NDVI} / \Delta \geq 0.4$ , где:  $\Delta$  – разность между максимальным и минимальным значениями НРВИ.

Невыполнение условия (24) свидетельствует о необходимости повышения четкости фотоизображения с использованием математического аппарата линейного контрастирования реализуемого при помощи следующей зависимости:

$$y^0 = 255 \cdot (y - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}), \quad (28)$$

где:  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  – минимальное и максимальное значения фототона элементов изображения;  $y$  – текущее значение фототона;  $y^0$  – новое текущее значение фототона.

Если после контрастирования фотоизображения значение показателя ( $\chi$ ) ниже 0.75, это свидетельствует о том, что при определении контуров ОРС на ключевых участках были допущены ошибки. Их устранение достигается уточнением контуров в интерактивном режиме и повторением процедуры расчетов.

Второй составляющей базы знаний являются параметры экотонов эталонного ландшафта, который выбирается из совокупности региональных ландшафтов по критерию максимальности видового разнообразия.

Для определения параметров экотонов эталонного ландшафта используются следующие зависимости (Аношко В.С.):

$$P_{etalon} = \sum_{p=1}^n S_{etalon}^p / [S_{etalon} - (\sum_{p=1}^n S_{etalon}^p + \sum_{r=1}^m S_{etalon}^r)], \quad (29)$$

где:  $P_{etalon}$  – плотность экотонов эталонного ландшафта;  $S_{etalon}^p, S_{etalon}^r$  – площади  $p$ -го экотона и  $r$ -ой антропогенно освоенной территории в эталонном ландшафте, га;  $S_{etalon}$  – площадь эталонного ландшафта, га;  $n, m$  – количество экотонов и антропогенно освоенных территорий в эталонном ландшафте.

$$Q_{etalon} = \sum_{p=1}^n q_{etalon}^p \times S_{etalon}^p / \sum_{p=1}^n S_{etalon}^p, \quad (30)$$

где:  $Q_{etalon}$  – контрастность экотонов эталонного ландшафта;  $q_{etalon}^p$  – ранг (балл), характеризующий степень контрастности  $p$ -го экотона эталонного ландшафта;  $S_{etalon}^p$  – площадь  $p$ -го экотона в эталонном ландшафте, га.

Третьей составляющей базы знаний являются параметры контрастности экотонов, которые характеризуют степень отличия формирующих их ОРС друг от друга. Для определения контрастности экотонов предлагается использовать экспертный метод парных сравнений. Его выбор обусловлен простотой проведения экспертизы и хорошими результатами экспертного анализа. При реализации данного метода экспертам последовательно предъявляются пары альтернатив, в каждой из которых предлагается выбрать более предпочтительное решение (Т. Саати).

**Метод автоматизированного определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования.** Он включает в себя дешифрирование аэрофотоснимков в автоматизированном режиме с использованием базы знаний и определение экологически допустимого уровня мелиоративного освоения изучаемых ландшафтов.

В основу автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков заложен машинно–ориентированный способ извлечения информации на основе прямых дешифровочных признаков. Предложенный автором метод содержит новизну, заключающуюся в использовании при обработке материалов аэрофотосъемки формализованных знаний о дешифровочных признаках ОРС и логического подхода к распознаванию фотоизображений. Дешифрирование включает в себя последовательное выделение контуров ОРС путем сравнения рассчитанных значений НРВИ с эталонными значениями, хранящимися в базе знаний и формирование на этой основе контуров

экотонов. Этот процесс осуществляется следующим образом: объект  $E_{pq}$ , где  $p = 1...e$ , будем считать экотонном  $p$ -го типа с контрастностью  $q$ , если на границе двух смежных разнотипных ОРС существует область с неопределенным НРВИ, значение которого не выходит за пределы, заданные в множестве  $R_{NDVI}$ . Результатом дешифрирования является карта экотонов. Структурная схема реализации предлагаемого автором метода представлена на рис.4. Кратко рассмотрим ее основные особенности.

*Блок 1.* В процессе его реализации для исследуемых ландшафтов рассчитываются НРВИ по зависимости (19). Расчет осуществляется для каждой пары пикселей (элементов изображений), последовательно выбираемых из цифровых массивов трансформированных аэрофотоснимков. Полученные результаты оформляются в виде карты НРВИ.

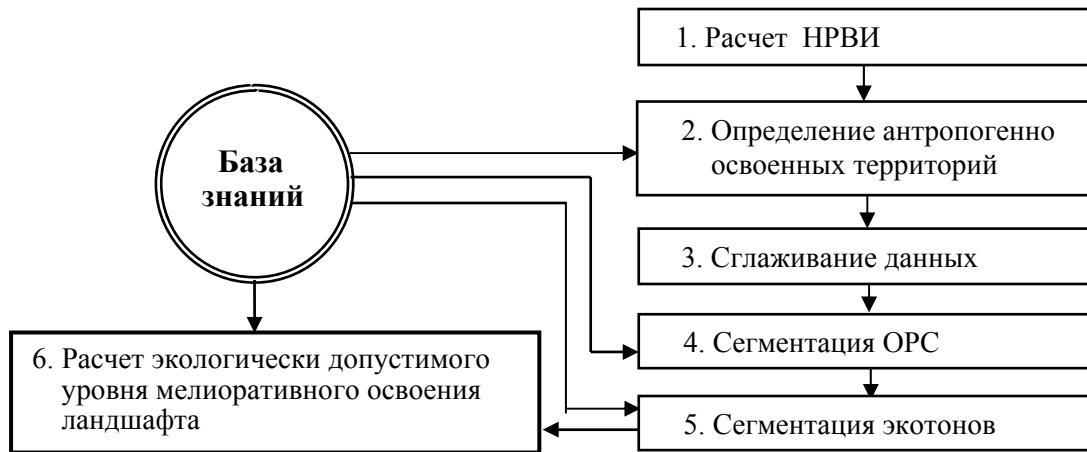


Рис. 4. Структурная схема алгоритма автоматизированного определения по данным дистанционного зондирования экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта

*Блок 2.* В процессе его реализации по значениям НРВИ выбираются антропогенно освоенные территории (дороги и дорожные сооружения, гидротехнические, промышленные и селитебные объекты и др.). Индексы НРВИ для таких объектов существенно отличаются от индексов, соответствующих растительному покрову, они, как правило, лежат в области отрицательных значений (П. Кронберг). Выбор осуществляется путем последовательного сравнения индексов карты НРВИ с минимальными и максимальными значениями НРВИ, определенными в базе знаний для растительного покрова. Полученные результаты оформляются в виде карты антропогенно освоенных территорий.

*Блок 3.* Включает в себя работы по выравниванию спектральных образов дешифрируемых объектов с целью исключения одиночных помех. Сглаживание данных осуществляется методом медианной фильтрации квадратным окном размерностью  $(M \times M)$  по следующей зависимости:

$$R_{NDVI} = (1/M^2) \sum_{g=i}^{i+M} \sum_{h=j}^{j+M} R_{NDVI,g,h}, \quad (31)$$

где:  $i = 1...n, j = 1...m$  – порядковые номера элементов карты НРВИ по строкам и столбцам;

$g, h$  – текущие значения обрабатываемого элемента в пределах окна по строкам и столбцам.

Полученные результаты оформляются в виде карты сглаженных значений НРВИ.

*Блок 4.* Включает в себя сегментацию ОРС. В ее основу заложен алгоритм локальной кластеризации (Ш. Шекхар). Сегментация выполняется по карте НРВИ с установлением принадлежности выделенного кластера типу ОРС. Кластерам, образованным неустановленными классификатором индексами, присваиваются свои кодовые обозначения, отличные от хранящихся в базе знаний. В результате создается набор карт ОРС и карт неустановленных объектов. Далее в пределах каждой карты методом «наименьшего однородного сегмента, ассимилируемого ядром» (Smith S.M.) выполняется предварительное оконтуривание каждого массива кодов. На практике размер ядра ( $l_1 \times l_1$ ) выбирается равным (3x3) точки, размер оболочки ( $l_2 \times l_2$ ) – (7x7) точек, весовая функция ( $F$ ) используется для установления степени генерализации при исследовании контура и определяется по следующей зависимости:

$$F = (1 - (l_2 - l_1)/l_2) \cdot S_1 + ((l_2 - l_1)/l_2) \cdot S_2, \quad (32)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - площади ядра и оболочки соответственно при  $l_2 > l_1$ . Отслеживание контура осуществляется путем перемещения окна по границе ядра вдоль границы объекта и проверки площади захвата на каждом шаге. Изменение направления перемещения окна выполняется в случае уменьшения площади более чем на 15%. Применение этого метода позволяет снизить чрезмерную изрезанность контуров и удалить «нитевидные» включения других контуров. Процесс завершается фиксацией полученных контуров в отдельные карты для ОРС и предполагаемых экотонов.

*Блок 5.* Включает в себя сегментацию экотонов. Для ее реализации предлагается авторский подход, построенный на результатах исследований, приведенный в работах (Ф. Свейн, М. Шеймос, У. Прэтт). Новизна подхода заключается в разработке алгоритма создания контуров экотонов, представляющих в большинстве случаев невыпуклые геометрические фигуры. Для этого по границе экотона определяются точки, семантически связанные с двумя типами ОРС. В том случае, если точка связана большим числом ОРС, выполняется формирование «усеченных» контуров построением равноудаленных кривых и нахождением точек их пересечения. Перпендикуляры, направленные из точек пересечения к контурам ОРС, образуют стороны контуров анализируемых экотонов. Предлагаемый подход всегда имеет геометрическое решение. Для выделенных экотонов, по кодам ОРС, их формирующих, из базы знаний выбираются значения контрастности.

*Блок 6.* Включает в себя расчет индексов видового разнообразия ландшафтов, которые определяются по следующей зависимости:

$$J_i = P_i \cdot Q_i, \quad (33)$$

где:  $P_i = [\sum_{p=1}^n s_p / (S_i - \sum_{p=1}^n s_p - \sum_{r=1}^m s_r)] / P_{etalon}$ ;  $Q_i = (\sum_{p=1}^n q_p \times s_p / \sum_{p=1}^n s_p) / Q_{etalon}$ , (34, 35)

где  $J_i$  – индекс видового разнообразия  $i$ -го ландшафта;  $P_i$  – плотность экотонов  $i$ -го ландшафта;  $Q_i$  – контрастность экотонов  $i$ -го ландшафта;  $s_p, s_r$  – площади  $p$ -го экотона и



$r$ -ой антропогенно освоенной территории в  $i$ -ом ландшафте,  $S_i$  – площадь  $i$ -го ландшафта, га;  $q_p$  – ранг (балл), характеризующий степень контрастности  $p$ -го экотона  $i$ -го ландшафта;  $n$ ,  $m$  – количество экотонных и антропогенно освоенных территорий в  $i$ -ом ландшафте.

Степень экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта ( $\Delta M$ ) определяется по следующей зависимости (Аношко В.С.):

$$\Delta M = 0.7 \times e^{-0.82J} \times 100\% \quad (36)$$

Приведенная зависимость показывает, что при максимальном индексе видового разнообразия ландшафта ( $J=1$ ) экологически допустимый уровень его мелиоративного освоения не может превышать 31%, а при минимальном ( $J=0$ ) – 70%.

Разработанные методы легли в основу созданной автором методики «Определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафта по данным дистанционного зондирования», которая была апробирована на модельной территории расположенной в пределах Лодейнопольского района (северо-восток Ленинградской области). В пределах модельной территории расположено 11 ландшафтов. Экологически допустимый уровень мелиоративного освоения территории составляет 49 %. Наибольшим (59%) обладает ландшафт аккумулятивных террасированных равнин, наименьшим (36%) – камовый ландшафт. В таблице 1 приведены данные допустимого уровня мелиоративного освоения по ландшафтам, входящим в состав модельной территории.

Таблица 1

Допустимый уровень мелиоративного освоения территории  
по видам ландшафтов северо-востока Ленинградской области

Наименование вида ландшафта	Допустимый уровень мелиоративного освоения, %
Камовые на песчаных валунных и песчаных отложениях	36
Речные поймы на песчаных аллювиальных отложениях	39
Аккумулятивные террасированные равнины на песчаных озерно-ледниковых отложениях	44
Аккумулятивные террасированные равнины на песчаных с гравием и галькой озерно-ледниковых отложениях	45
Холмисто-моренные на суглинистых и супесчаных валунных и песчаных ледниковых и озерно-ледниковых отложениях	47
Абразионные равнины на суглинистых и супесчаных валунных ледниковых отложениях	50
Аккумулятивные террасированные равнины на глинистых и суглинистых озерно-ледниковых отложениях	51
Озерные террасированные равнины на песчаных озерно-ледниковых отложениях	54
Абразионные равнины на суглинистых и супесчаных валунных щебнистых ледниковых отложениях	57
Аккумулятивные террасированные равнины на глинистых и суглинистых озерно-ледниковых отложениях	58
Аккумулятивные террасированные равнины на озерно-ледниковых безвалунных глинах и суглинках	59

**Выводы:**

1. В качестве теоретического базиса для определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения территории принята взаимосвязь между биологическим разнообразием ландшафта и его устойчивостью к антропогенным воздействиям.

2. Структура растительного покрова ландшафта определяется по различию спектральных образов растительных сообществ, полученных в красной и ближней инфракрасной зонах спектра.

3. Для автоматизированного дешифрирования снимков разработана база знаний, основанная на объектно-ориентированном подходе, обеспечивающем создание формализованных знаний, их хранение, управление процессом эталонирования вегетационных индексов и выработку дешифровочного решения.

4. Создан метод автоматизированного определения по данным дистанционного зондирования экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов. В ее основе машинно-ориентированный способ извлечения информации с использованием базы знаний, логический метод определения семантических характеристик экотонов, позволяющие рассчитывать индекс биоразнообразия ландшафта, изменяющийся от нуля до единицы. Максимальная степень мелиоративного освоения допускается для ландшафтов, имеющих индекс биоразнообразия, близкий к нулю, а минимальная степень – для ландшафтов, индекс биоразнообразия которых близок единице.

5. Разработана методика определения экологически допустимого уровня мелиоративного освоения ландшафтов с использованием ДПЛА, реализующая разработанные автором методы.

6. Выполнена апробация разработанной методики на примере оценки ландшафтов Лодейнопольского района (северо-восток Ленинградской области). Согласно полученным результатам, экологически допустимый уровень мелиоративного освоения территории составляет 49 %, что не противоречит требованиям официально принятых методик по мелиоративному освоению территорий в РФ.

7. Разработанные методические подходы могут быть использованы для решения следующих задач: оценки эффективности систем мелиорации, анализа динамики восстановления лесов после пожаров, анализа эффективности рекультивации мест открытой добычи полезных ископаемых, оценки эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения, оценки степени поражения растительности химическими загрязнениями и др.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

1. Осипов Г.К., Тимофеев В.Г. Оценка устойчивости ландшафта к мелиоративному освоению территории с использованием данных дистанционного зондирования // Региональная экология, № 3-4, 2006. – с. 99 – 105.

2. Тимофеев В.Г. Использование дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов для оперативного выявления изменений местности // Тезисы докладов научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП», посвященной 60-летию предприятия (10-12 октября 2006 г.). – М., 2006.- с. 340.

3. Осипов Г.К., Присяжнюк С.П., Суворов С.Г., Тимофеев В.Г. Роль и место дистанционно пилотируемых летательных аппаратов в информационном обеспечении систем управления // Труды по материалам третьей военно-научной конференции Космических войск. Том 3, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – с.472 – 480.