

Научно-методические основы определения экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов при создании природно-аграрных систем

Scientific and methodological basis for the definition of an environmentally acceptable level of development of the natural landscape while creating natural agricultural systems

Осипов / Osipov A.

Алексей Георгиевич

(zoyaks@yandex.ru)

кандидат географических наук.

ФКВГОУ ВПО «Военно-космическая академия

им. А. Ф. Можайского» МО РФ,

доцент кафедры.

г. Санкт-Петербург

Тимофеев / Timofeev V.

Виталий Григорьевич

(tv_g_167@mail.ru)

кандидат технических наук.

ОАО МКБ «Компас»,

ведущий специалист.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: биологическое разнообразие – biological diversity; природный ландшафт – natural landscape; экотон – ecotone; плотность экотонов – the density of ecotones; контрастность экотонов – contrast ecotones; база знаний – knowledge base; эталонирование – calibration; классификация информации – classification information; основное растительное сообщество – the main plant community; вегетационный индекс – vegetation index; фототон – phototon; сглаживание данных – data smoothing; сегментация – segmentation; уровень освоения ландшафта – level of development of the landscape.

Рассмотрены подходы к определению экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов с использованием данных дистанционного зондирования Земли, основанные на учете снижения биоразнообразия за счет ликвидации экотонов при аграрном освоении территории.

Approaches to determination of natural landscapes ecologically admissible reclamation level using Earth remote sensing and taking in account biological diversity reduction due to ecotone liquidation are considered.

Хозяйственная деятельность человека активно снижает биологическое разнообразие природных ландшафтов, в результате чего происходит глобальное обеднение биоты и в связи с этим систематическое снижение способности Земли поддерживать функции средо- и ресурсовоспроизводства. Следовательно, нарушение биоразнообразия – это потеря потенциала поддержания жизни на Земле.

Осознание того факта, что устойчивость биосферы зависит от устойчивости экосистем, которая немис-

лима без сохранения видового разнообразия, привело к принятию в 1992 году Конвенции о биологическом разнообразии, подписанной 140 странами и ратифицированной Россией в 1995 году.

В настоящее время биоразнообразие рассматривается как важнейший комплексный системообразующий природный ресурс, обеспечивающий выживание человека и его экономическую деятельность, который тесно связан с другими природными ресурсами. Озабоченность состоянием биоразнообразия привела к формированию отдельного направления природоохранной деятельности. По мнению большинства специалистов для сохранения биоразнообразия природных ландшафтов достаточно регулирования предельно допустимых нагрузок на природную среду, обеспечивающих сохранение типичных условий местообитания флоры и фауны.

В природных ландшафтах наибольшее биоразнообразие свойственно экотонам – переходным полосам между физиономически отличимыми растительными сообществами, которые являются своеобразными «зонами напряжения», оказывающими компенсирующее влияние на устойчивость естественных биогеоценозов при антропогенном освоении территории [10].

Каждый природный ландшафт характеризуется свойственным ему набором экотонов (закустаренных территорий, естественных лугов, болот, водных объектов и т.д.), которые определяют его экологическое разнообразие. При создании природно-аграрных систем происходит неизбежное упрощение структуры природного ландшафта за счет распахки земель и, как следствие, сокращение числа экотонов, что приводит к снижению его устойчивости [1, 3, 4, 6]. Определение допустимого

уровня аграрного освоения природных ландшафтов должно строиться на анализе его ландшафтной неоднородности. При этом следует учитывать, что с увеличением ландшафтной неоднородности величина допустимого изменения экологического разнообразия ландшафта уменьшается и наоборот.

Для определения экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов при создании природно-аграрных систем необходимо рассчитать индексы их видового разнообразия, которые зависят от плотности и контрастности свойственных им экотонов.

Выделение экотонов в пределах природного ландшафта целесообразно осуществлять по данным дистанционного зондирования Земли с использованием методов автоматизированного дешифрирования почвенно-растительного покрова [8].

В основу автоматизированного дешифрирования почвенно-растительного покрова целесообразно закладывать формализованные знания, о прямых дешифровочных признаках основных растительных сообществ, а также логический подход к обработке фотоизображений. Процесс дешифрирования заключается в последовательном выделении контуров основных растительных сообществ путем сравнения рассчитанных по фотоизображению значений их вегетационных индексов (ВИ) с эталонными индексами, хранящимися в базе знаний. Принцип формирования объектов дешифрирования с точки зрения топологических отношений, характеризующих биоразнообразие природного ландшафта, определим следующим образом: объект E_{pq} , где $p=1...k$, будем называть экотоном p -го типа с контрастностью q , если в пределах границ смежности двух основных растительных сообществ разных типов существует область с неопределенным вегетационным индексом, значение которого не выходит за пределы интервала допустимых значений ВИ для растительного покрова [5, 8].

Реализация предлагаемого подхода включает в себя три этапа: 1) формирование базы знаний; 2) эталонирование дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова; 3) определение экологически допустимого уровня освоения природного ландшафта при создании природно-аграрных систем. Рассмотрим каждый из этапов более подробно.

Формирование базы знаний

Основу базы знаний, рис. 1, составляют отношения «Типы основных растительных сообществ», «Биоразнообразие эталонного ландшафта» и «Контрастность экотонов». Объекты базы знаний представляют собой записи в отношениях. Каждый объект имеет уникальный идентификатор (ключ, на схеме выделен подчеркиванием). Наименования и ключи объектов являются глобальными атрибутами. Структуру фрейма-прототипа объектов дешифрирования – «основные растительные сообщества» образуют атрибутивные данные

отношения «Типы основных сообществ». В свою очередь, атрибутивные данные отношения «Контрастность экотонов» образуют структуру фрейма-прототипа объектов дешифрирования – «экотоны».

Рассмотрим классификацию информации в базе знаний. Объектами первого классификатора являются типы основных растительных сообществ (ОРС). Особенность их формирования заключается в логическом объединении видов растительности по признаку принадлежности к экосистемам, т.е. в качестве типов ОРС рассматриваются растительные экосистемы, характерные для изучаемой территории: лесные, луговые, экосистемы высшей водной растительности, болотные экосистемы. В этом случае подчиненными классификационными единицами являются виды растительности, например ельники, сосняки и т.д., которые включаются в ОРС «Лес». Типизация видов растительности, следовательно, и ОРС, осуществляется атрибутом <значение НРВИ> (нормализованный разностный вегетационный индекс), входящим в схему кортежа.

Объектами второго классификатора являются экотоны. Основной характеристикой экотона, определяющей компенсирующее влияние на природный ландшафт, является контрастность, классифицирующая экотоны в базе знаний по генетическому принципу – в зависимости от типов взаимодействующих основных растительных сообществ и от видового разнообразия природных ландшафтов. Соответственно, типизация экотонов осуществляется атрибутами <код типа ОРС (1)>, <код типа ОРС (2)>, <код вида ландшафта>, входящими в схему кортежа. Количество кортежей в отношении, таким образом, будет определяться числом парных сочетаний ОРС, заданных классификатором основных растительных сообществ. Необходимо заметить, что атрибуты, входящие в схему отношения «Контрастность экотонов», функционально зависимы.

Значения плотности экотонов и их контрастности, определенные для эталонного природного ландшафта, являются классификационными единицами отношения «Биоразнообразие эталонного ландшафта». Входящие в схему отношения «виды природных ландшафтов» позволяют упорядочить информацию в базе знаний по видам ландшафтов в случае, если максимумы плотности экотонов и их контрастности наблюдаются в двух разных ландшафтах.

Рассмотрим зависимости, используемые для определения основных показателей базы знаний: нормализованного разностного вегетационного индекса (НРВИ); вегетационного индекса, скорректированного за подстилающую поверхность (ПВИ); эталонных значений плотности экотонов и их контрастности.

1. Определение НРВИ. Возвращаемым значением являются вегетационный индекс и его разброс. Они определяются с использованием следующих зависимостей:

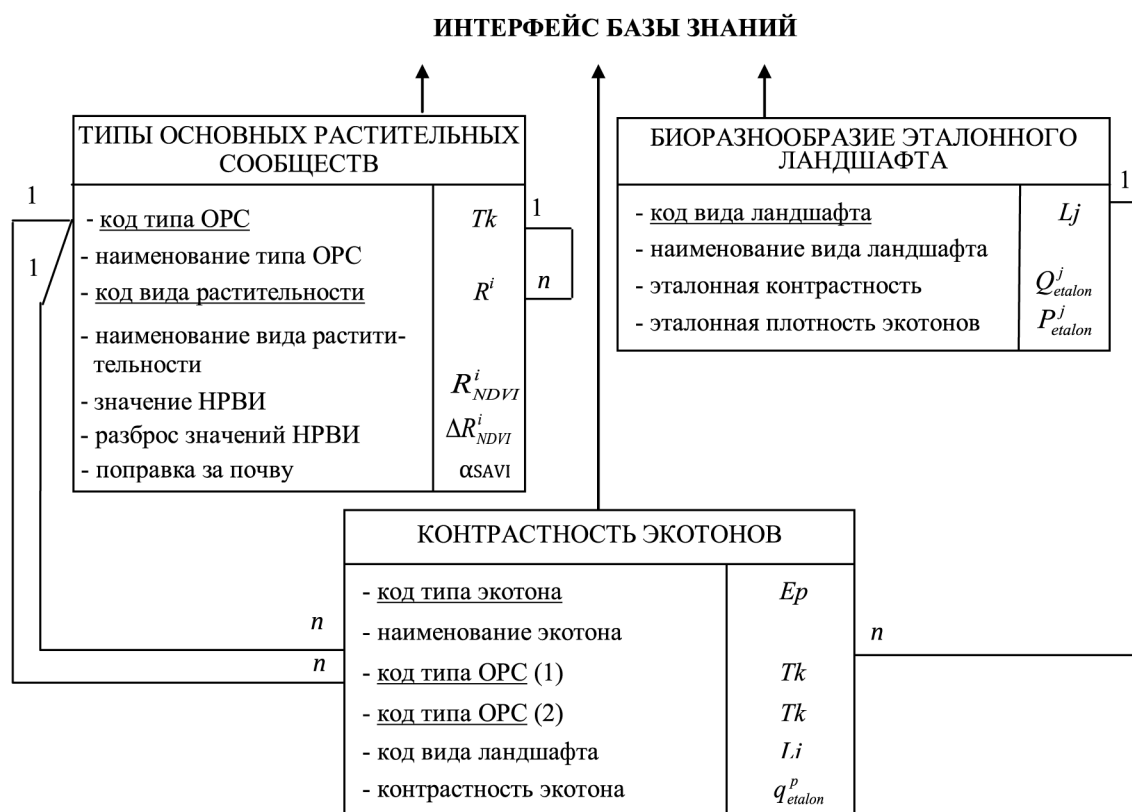


Рис. 1. Схема базы знаний

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

$$R_{NDVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{NDVI_p}^i; \quad (1)$$

$$\Delta R_{NDVI}^i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{NDVI_p}^i - R_{NDVI}^i)^2}, \quad (2)$$

$$R_{NDVI} = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}), \quad (3)$$

где: R_{NDVI}^i – значения НРВИ; ΔR_{NDVI}^i – разброс НРВИ; $p \in [1...k]$ – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам заданных ОРС; R_{RED} , R_{NIR} – значения отраженного растительностью света в красной и ближней инфракрасной областях.

2. Определение ПВИ. Возвращаемым значением являются вегетационный индекс, скорректированный за подстилающую поверхность и его разброс. Они определяются с использованием следующих зависимостей:

$$R_{SAVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{SAVI_p}^i; \quad (4)$$

$$\Delta R_{SAVI}^i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{SAVI_p}^i - R_{SAVI}^i)^2}, \quad (5)$$

$$R_{SAVI} = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + \alpha} (1 + \alpha), \quad (6)$$

где: R_{SAVI}^i – значения ПВИ; ΔR_{SAVI}^i – разброс ПВИ; $p \in [1...k]$ – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам заданных ОРС, α – поправка за подстилающую поверхность: $\alpha \in [0, ..., 1]$.

Из приведенных соотношений видно, что данный подход является полиморфным, в качестве параметров класса выступают совокупности значений вегетационных индексов, рассчитываемых в пределах интерактивно выделенных эталонных контуров ОРС.

3. Определение эталонных значений плотности экотонов и их контрастности. Возвращаемыми значениями являются эталонная плотность экотонов и их контрастность. Они определяются с использованием следующих зависимостей:

$$P_{etalon} = \sum_{j=1}^n s_{etalon}^j / [S_{etalon} - (\sum_{j=1}^n s_{etalon}^j + \sum_{r=1}^m s_{etalon}^r)] \quad (7)$$

где: P_{etalon} – плотность экотонов эталонного ландшафта; s_{etalon}^j , s_{etalon}^r – площади j -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.

$$Q_{etalon} = \sum_{p=1}^n q_{etalon}^p \times s_{etalon}^p / \sum_{p=1}^n s_{etalon}^p, \quad (8)$$

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

Ранги контрастности экотонов определяются экспертными методами. Авторы предлагают для решения данной задачи использовать экспертный метод парных сравнений, подробно изложенный им в работах [2, 5]. Его выбор был обусловлен простотой проведения экспертизы и хорошими результатами экспертного анализа.

Одной из основных особенностей рассмотренного подхода к формированию базы знаний является введение в ее интерфейс логических операций, управляющих процессом корректировки дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова, который рассмотрим более подробно.

Корректировка дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова обусловлена снижением показателя достоверности машинной классификации, зависящего от трех групп факторов: 1) интегрирующих свойств растительности; 2) отсутствия резких различий растительности внутри одного природного ландшафта; 3) влияния почв, выходов скальных пород и др. Для устранения влияния этих факторов предлагается алгоритм коррекции вегетационного индекса, представленный на рис. 2, который используется при проведении автоматизированного дешифрирования экотонов. Рассмотрим работу основных блоков данного алгоритма.

В блоке 1 выполняется определение значения показателя достоверности машинной классификации ОРС, рассчитываемое по следующей зависимости:

$$\chi = \frac{N_m}{N}, \quad (9)$$

где: N_m – количество правильно отдешифрированных (машинно-классифицированных) объектов; N – общее количество интерактивно выделенных объектов.

В случае снижения его значения ниже 0.75, осуществляется переход к блоку 3, в котором для интервалов $R_i = [R_{NDVI}^i - \Delta R_{NDVI}^i / 2, R_{NDVI}^i + \Delta R_{NDVI}^i / 2]$ и отсортированных в порядке возрастания значений НРВИ рассчитывается следующее выражение:

$$[R_i \cap R_{i+1} = \emptyset] \vee [(R_{NDVI}^{i+1} - \Delta R_{NDVI}^{i+1} / 2) - (R_{NDVI}^i + \Delta R_{NDVI}^i / 2) \geq \Delta R], \quad (10)$$

где: ΔR – наименьшее из всех значений ΔR_{NDVI}^i , определенных в отношении «Типы основных растительных сообществ».

Невыполнение хотя бы одного из членов зависимости (10) свидетельствует об отсутствии выраженных границ между индексами ОРС. Проверка осуществляется в блоке 4 и, при необходимости, выполняется устранение перекрытий (блок 8) путем введения в (6) поправки за подстилающую поверхность (α_{SAVI}). При этом ВИП рассчитывается по зависимости (4).

Расчет поправки α_{SAVI} выполняется итерационным способом с шагом 0.1 в интервале $\alpha_{SAVI} = [0.1, 1.0]$. 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 (δ_{NDVI}) в шкале допустимых для растительности (блок 5) по следующей зависимости:

$$\delta_{NDVI} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{NDVI}^i - R_{NDVI})^2}, \quad (11)$$

где:

$$R_{NDVI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{NDVI}^i \quad (12)$$

В блоке 6 проверяется выполнение следующего условия:

$$\delta_{NDVI} / \Delta \geq 0.4 \quad (13)$$

где: Δ – разность между максимальным и минимальным значениями НРВИ, определенными для растительности (на практике выбираются равными 0.8 и 0.35 соответственно).

Невыполнение условия свидетельствует о низкой выразительности фотоизображения. Расширение диапазона НРВИ достигается линейным контрастированием фотоизображения – пересчетом значений его фототона. При этом выполняется растяжение диапазона колебаний фототона: наиболее темному из них присваивается значение «0», а наиболее светлому – «255». Результатом пересчета будет являться новое изображение, с более выраженными тонкими различиями фототона. Контрастирование выполняется в одном масштабе для двух фотоизображений.

В случае выполнения условий 4 и 6 низкие значения показателя достоверности свидетельствуют о наличии ошибок в действиях оператора. Их устранение достигается уточнением контуров ОРС на фотоизображении в интерактивном режиме. Обработка данных заканчивается установкой новых значений R_{NDVI}^i , ΔR_{NDVI}^i в отношении «Типы основных растительных сообществ» базы знаний (блок 7). Результатом работ являются упорядоченные по основным растительным сообществам значения НРВИ в соответствии со следующей зависимостью:

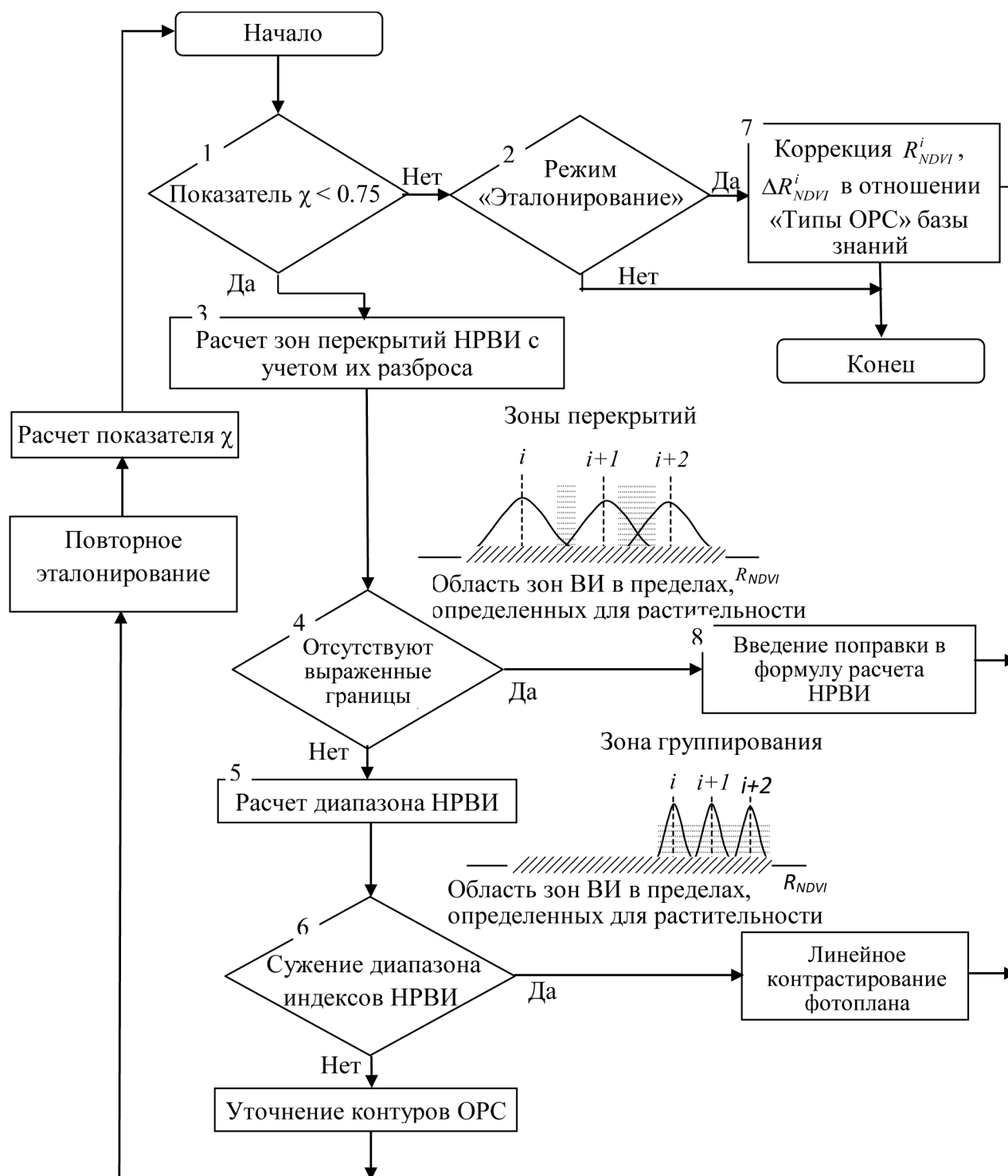


Рис. 2. Структурно-логическая схема алгоритма коррекции вегетационного индекса (пронумерованные блоки являются частью интерфейса базы знаний)

$$T \cap R_{NDVI} \neq \emptyset, T_k \in T, R_{NDVI}^i \in R_{NDVI} \\ \text{при } i = 1 \dots n, k = 1 \dots m, \quad (14)$$

где: T_k – тип k -го основного растительного сообщества; R_{NDVI}^i – эталонное значение НРВИ; n – количество эталонных значений НРВИ; m – количество типов основных растительных сообществ.

Эталонирование дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова

Структурно-логическая схема эталонирования дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова по данным дистанционного зондирования, представлена на рис. 3.

Блок 1. Заключается в заполнении базы знаний данными, характеризующими типы основных растительных сообществ, а также сложность природных ландшафтов по структуре и контрастности экотонов.

Блок 2. Выделение контуров основных растительных сообществ осуществляется по ортофотоизображению в интерактивном режиме с использованием ландшафтной карты. В случае получения показателя достоверности машинной классификации $\chi \leq 0.75$, когда коррекцией ВИ или контрастированием ортофотоплана повысить достоверность не удастся, выполняется повторное выделение контуров ОРС. При этом оператору предоставляется возможность интерактивно выполнить анализ возникающих ошибок.

Блок 3. Заключается в вычислении индексов НРВИ по зависимости (1) для каждой пары пикселей (элементов изображений), последовательно выбираемых из цифровых массивов фотоизображений в пределах выделенных контуров ОРС. При этом предполагается, что хранение исходных данных в цифровом виде осуществляется в базе данных. Результатом работы блока является производное изображение – карта НРВИ.

Блок 4. Заключается в выравнивании спектральных образов объектов дешифрирования на карте НРВИ

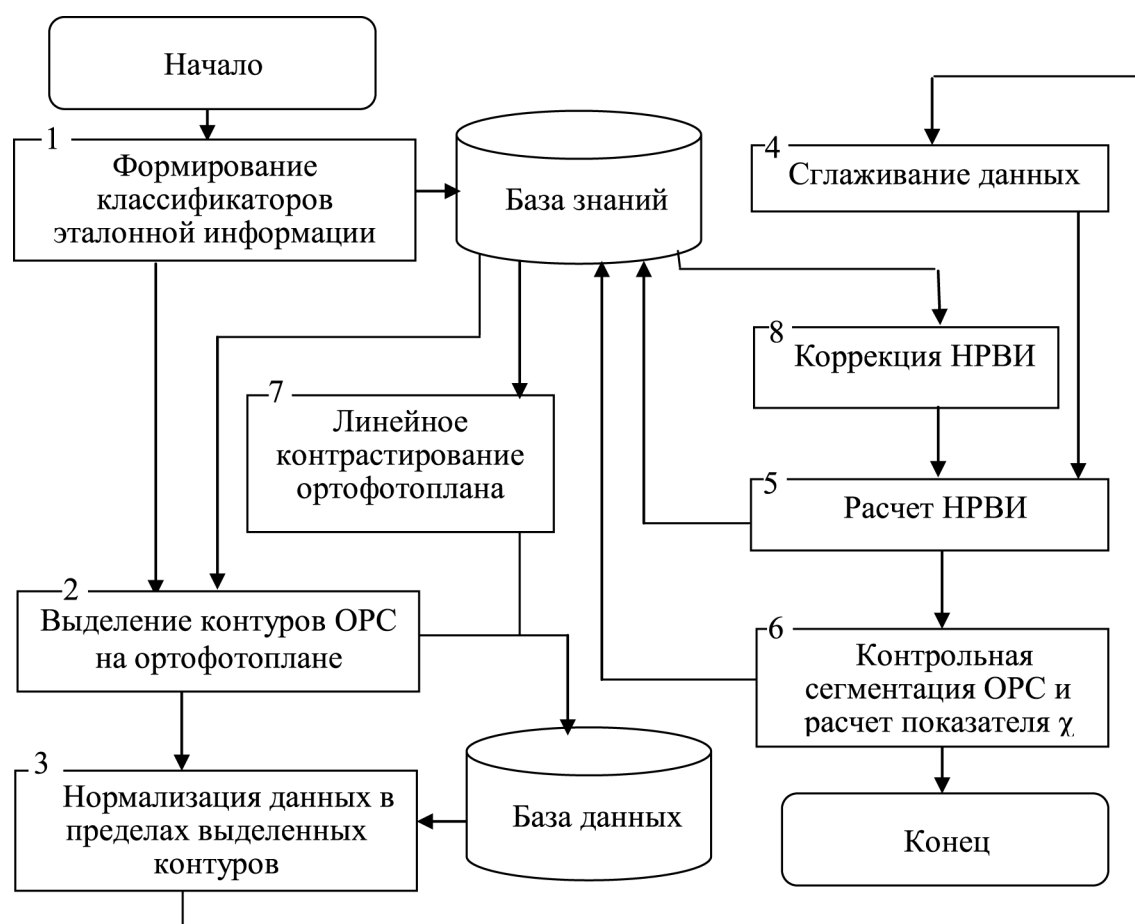


Рис. 3. Структурно-логическая схема эталонирования дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова по данным дистанционного зондирования

с целью исключения высокочастотной составляющей (одиночных помех). Сглаживание данных осуществляется методом медианной фильтрации квадратным окном размерностью $(M \times M)$ по следующей зависимости:

$$R_{NDVI} = (1/M^2) \sum_{g=i}^{i+M} \sum_{h=j}^{j+M} R_{NDVI_{g,h}}, \quad (15)$$

где $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$ – порядковые номера элементов карты НРВИ по строкам и столбцам соответственно; g, h – текущие значения обрабатываемого элемента данных в пределах окна по строкам и столбцам соответственно.

Результатом операции сглаживания является карта сглаженных значений НРВИ.

Блок 5. Заключается в расчете по зависимостям (1–6) значений НРВИ и их разбросов для каждого растительного сообщества. Рассчитанные значения сохраняются в отношении «Типы основных растительных сообществ» базы знаний.

Блок 6. Выполняется сегментация основных растительных сообществ с использованием полученных индексов НРВИ. Осуществляется расчет показателя достоверности машинной классификации основных растительных сообществ с использованием математического аппарата базы знаний по зависимости (9) в интерактивном режиме. Процесс эталонирования заканчивается в случае достижения показателя достоверности $\chi > 0.75$.

Блок 7. Заключается в линейном контрастировании ортофотоизображения, осуществляемом в том случае, если на предыдущем этапе значение показателя достоверности машинной классификации $\chi \leq 0.75$. Для этого используется следующая зависимость:

$$y^0 = 255 \cdot (y - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}), \quad (16)$$

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

Блок 8. Заключается в осуществлении коррекции вегетационного индекса в случае низкого значения показателя достоверности машинной классификации $\chi \leq 0.75$. Коррекция осуществляется с использованием математического аппарата базы знаний.

Как следует из описания вышеприведенного алгоритма, процессы, происходящие при эталонировании, носят циклический характер. Это обеспечивает наиболее точную настройку на характерные особенности исследуемой территории и особенности съемочного материала.

3. Определение экологически допустимого уровня освоения природного ландшафта при создании природно-хозяйственных систем. Структурно-логическая схема данного этапа работ, представлена на рис. 4.

Блок 1. Нормализация выполняется для всех элементов фотоизображения исследуемого участка, в отличие от подобной операции при проведении этапа

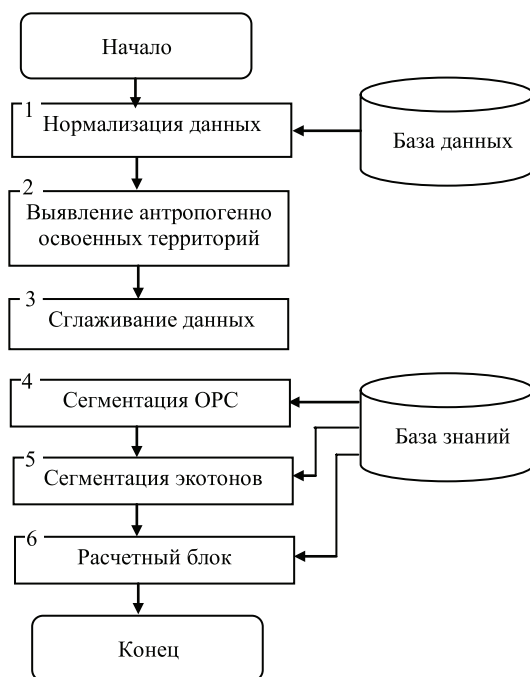


Рис. 4. Структурно-логическая схема алгоритма определения экологически допустимого уровня освоения природного ландшафта при создании природно-хозяйственных систем

эталонирования. При ее реализации индексы НРВИ вычисляются по зависимости (3) для каждой пары пикселей (элементов изображений), последовательно выбираемых из цифровых массивов фотоизображений.

Блок 2. Выявление антропогенно освоенных территорий выполняется с целью исключения неконтролируемых объектов классификации. К ним относятся дороги, строения, дорожные сооружения и другие искусственные объекты. Индексы НРВИ для таких объектов существенно отличаются от индексов, соответствующих растительности, и лежат, как правило, в области отрицательных значений. Реализация данного блока осуществляется путем последовательного проверки «попадания» ВИ искусственных объектов в интервал допустимых значений ВИ, определенных для растительности (Δ).

Площади элементов карты НРВИ, соответствующих этим индексам, суммируются и фиксируются в карте антропогенно освоенных территорий.

Блок 3. Сглаживание данных заключается в выравнивании спектральных образов объектов дешифрирования. Оно осуществляется методом медианной фильтрации по зависимости (15).

Блок 4. Процесс сегментации ОРС основан на методе локальной кластеризации. Он реализуется следующим образом. Методом «ближайших соседей» выполняется предварительная сегментация областей в матрице НРВИ с равными индексами с установлением принадлежности выделенного кластера типу основного растительного сообщества. Кластерам, образованным неустановленными классификатором индексами, присваиваются свои кодовые обозначения, отличные от хранящихся в базе знаний (принадлежащих предполагаемым типам экотонов). В результате будет сформирован набор карт, элементами которых являются коды типов основных растительных сообществ, а также коды неустановленных объектов. Для оконтуривания каждого массива кодов используется метод «наименьшего однородного сегмента, ассимилируемого ядром» [11–14]. Размер ядра сегмента ($l_1 \times l_1$) выбирается равным (3x3) точек, размер оболочки ($l_2 \times l_2$) – (7x7) точек, весовая функция (F), используемая для установления степени генерализации исследуемого контура, определяется по формуле:

$$F = (1 - (l_2 - l_1)/l_2) \cdot S_1 + ((l_2 - l_1)/l_2) \cdot S_2, \quad (17)$$

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 контура объекта и проверки площади захвата на каждом шаге. Изменение направления перемещения окна выполняется в случае уменьшения площади более чем на 10%. Применение этого метода позволяет снизить чрезмерную изрезанность контуров и удалить «нитевидные» включения других контуров. Операция завершается фиксацией полученных координат контуров в отдельные списки

($\langle T_{ij} \rangle$) для основных растительных сообществ и ($\langle N^* \rangle$) для предполагаемых экотонов.

Блок 5. Для сегментации экотонов предлагается подход, разработанный на основе «Открытого алгоритма для выпуклой оболочки» [9]. Его новизна заключается в способе создания контуров экотонов, являющихся в большинстве своем невыпуклыми фигурами. Для этого выполняется анализ характерных точек контуров объектов с неустановленными НРВИ, предположительно являющихся экотонами. Характерными будем называть точки контура объекта, семантически связанные с двумя типами основных растительных сообществ. Последовательно проверяются координаты точек контуров объектов из списка $\langle N^* \rangle$ на предмет смежности с координатами точек контуров из списков $\langle T_{ij} \rangle$. Если контур анализируемого объекта образован в пределах границ двух основных растительных сообществ с контурами в списках $\langle T_{ij} \rangle$, осуществляется выборка из базы знаний значения его контрастности и устанавливается факт распознавания экотона p -го типа с контрастностью $r - E_{pr}$. В случае если характерных точек больше двух (экотон образован тремя и большим числом основных растительных сообществ), выполняется формирование «усеченных» контуров построением равноудаленных от контуров основных растительных сообществ кривых и нахождением точек их пересечения. Перпендикуляры, направленные из точек пересечения к контурам основных растительных сообществ, образуют стороны «усеченных» контуров предполагаемых экотонов. Предлагаемый подход всегда имеет геометрическое решение и конечную вычислительную сложность (решение находится за линейное число шагов $N \log N$, где N – суммарное количество точек анализируемых контуров). Экотон идентифицируется путем выборки значений их контрастности из базы знаний по кодам основных растительных сообществ, в процессе взаимодействия которых они образованы.

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

$$J_i = P_i \cdot Q_i, \quad (18)$$

где:

$$P_i = [\sum_{p=1}^n s_p / (S_i - \sum_{p=1}^n s_p - \sum_{r=1}^m s_r)] / P_{etalon}; \quad (19)$$

$$Q_i = (\sum_{p=1}^n q_p \times s_p / \sum_{p=1}^n s_p) / Q_{etalon}; \quad (20)$$

где: J_i – индекс видового разнообразия i -го природного ландшафта; P_i – плотность экотонов i -го природного ландшафта; Q_i – контрастность экотонов i -го природного ландшафта; s_p , s_r – площади p -го экотона и r -ой антропогенно освоенной территории в i -ом природном ландшафте, га; q_p – ранг (балл), характеризующий степень контрастности p -го экотона i -го природного ландшафта; n , m –

количество экотонов и антропогенно освоенных территорий в i -ом природном ландшафте.

Степень экологически допустимого уровня освоения природного ландшафта при создании природно-аграрных систем (ΔM) определяется по следующей зависимости:

$$\Delta M = 0.7 \times e^{-0.82J} \times 100\% . \quad (21)$$

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

Апробация разработанных научно-методических основ определения экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов при создании природно-аграрных систем была выполнена на примере бассейна р. Оять (северо-восток Ленинградской области).

В качестве эталонного ландшафта для изучаемой территории был выбран камовый ландшафт, его выбор был обусловлен тем, что в связи с сильной расчлененностью, в нем наиболее ярко выражены особенности видового разнообразия растительности, свойственные территории бассейна р. Оять в целом.

Видовое разнообразие растительности определялось путем сопоставления их флористического состава и использования справочных данных. Поскольку между близкими видами контрастность неразличима или слабо выражена, то осуществлялось их объединение по признаку принадлежности к экосистемам – лесам, лугам и др. Таким образом, в качестве типов основных растительных сообществ были приняты растительные экосистемы, характерные для изучаемой территории: лесные, луговые, экосистемы высшей водной раститель-

ности, болотные экосистемы. В свою очередь, болотные экосистемы подразделены на верховые и низинные.

Классификатор видов природных ландшафтов разработан на основе легенды ландшафтной карты. Он включает в себя десять классификационных единиц.

При формировании классификатора контрастности экотонов, сопоставлялись доминирующие виды растительности, характерные для большинства экосистем изучаемой территории. При этом учитывалось, что, в силу присущего растительности свойства континуальности, в переходных областях будут сосуществовать виды, принадлежащие разным экосистемам, в том числе и эволюционирующие, обнаруживаемые только в переходных областях. Следуя этому подходу, экотоны будут обнаруживаться в переходных (пограничных) областях разных экосистем, где виды соседствующих экосистем будут иметь равноправное влияние. Классификатор контрастности экотонов (табл. 1) разработан с использованием метода парных сравнений. В экспертной оценке принимало участие 8 экспертов.

В качестве инструментальной системы для проектирования базы знаний была использована объектно-ориентированная СУБД «Oracle 9i Database 9.2.0.1.0». Программное приложение, реализующее ввод и обработку данных базы знаний, разработано в среде программирования «Oracle Designer (release 6.0)».

Аэрофотосъемка эталонного ландшафта общей площадью 137.83 км² была выполнена в двух зонах спектра с использованием ДПЛА [7]. Она характеризовалась следующими параметрами: перепады высот в пределах маршрутов составляли от 250 до 550 м; средняя величина продольных и поперечных перекрытий кадров колебалась в пределах от 28% до 96%; ширина обзора изменялась в пределах от 170 м до 380 м.

Таблица 1

Ранги контрастности экотонов эталонного природного ландшафта

Экосистемы	Лесные	Болота низинные	Болота верховые	Луговые	Водные экосистемы
Лесные	1	6	8	4	10
Болота низинные	–	1	4	5	3
Болота верховые	–	–	1	6	2
Луговые	–	–	–	1	8
Водные	–	–	–	–	1

Таблица 2

Распределение экотонов в эталонном природном ландшафте

Тип экотона	Количество экотонов	Суммарная площадь экотонов (кв. км)
Болота верховые-водные экосистемы	12	0.96
Лесные-луговые экосистемы	64	6.18
Лесные-болота низинные	16	1.28
Болота верховые-луговые экосистемы	62	4.26
Лесные-болота верховые	87	9.06
Луговые-водные экосистемы	48	9.94
Лесные-водные экосистемы	39	6.32

Таблица 3

Показатели экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов исследуемой территории при создании природно-аграрных систем

Тип ПТК	Индекс биоразнообразия	Плотность экотонов	Контрастность экотонов	Экологически допустимый уровень освоения (%)
1.1	0.47	0.64	0.73	47.1
1.2	0.79	0.35	2.26	36.4
2.1	0.39	0.60	0.65	50.2
2.2	0.38	0.64	0.59	51.4
2.3	0.55	0.67	0.81	44.6
2.4	0.54	0.78	0.69	45.2
3.1	0.31	0.62	0.50	54.3
3.2	0.24	0.51	0.47	57.4
3.3	0.23	0.56	0.41	57.9
4.1	0.69	0.76	0.90	38.8

Примечание. Типы ПТК: 1.1; 1.2 – холмисто-котловинные; 2.1; 2.2; 2.3; 2.4 – равнины с нормальными условиями увлажнения; 3.1; 3.2; 3.3 – равнины с длительным избыточным увлажнением; 4.1 – речная пойма.

В качестве картографической основы для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) использовалась топографическая карта масштаба 1: 100 000. Шаг дискретизации ЦМР составлял 10 м. Ее создание осуществлялось в среде ГИС «Карта 2011». Трансформирование отдельных снимков и объединение полученных растров в единое геоинформационное пространство осуществлялось с использованием созданного в среде «C++ Builder 6.0» программного приложения «Оценка экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов». Точность трансформирования при высоте сечения рельефа 5 м в пределах элементарного участка составила 8 м для равнинных участков местности и 10 м – для всхолмленных.

В процессе эталонирования для основных растительных сообществ были определены НРВИ. Результаты эталонирования помещены в базу знаний. Показатель достоверности машинной классификации для эталонного природного ландшафта составил 0.98.

По данным дешифрирования основных растительных сообществ с использованием зависимостей (7, 8) были рассчитаны и помещены в базу знаний показатели плотности и контрастности экотонов эталонного природного ландшафта. Распределение экотонов в эталонном природном ландшафте представлено в табл. 2. Плотность экотонов для эталонного природного ландшафта составила $P_{etalon} = 0.35$ при суммарной площади антропогенно освоенных территорий $S_j = 7.73 \text{ км}^2$. Контрастность эталонного природного ландшафта составила $Q_{etalon} = 2.25$. Индекс биоразнообразия составил $J = 0.79$.

Определение индексов биоразнообразия остальных ландшафтов изучаемой территории выполнялось с использованием ключевых участков. В пределах каждого ключевого участка обследовалась площадь не менее 25 км^2 . В качестве ключевых выбирались участки, в которых наблюдалось максимальное видовое разнообразие, характеризующее контрастность исследуемого природного ландшафта.

Для каждого ключевого участка по аэрофотоснимкам, полученным с использованием ДПЛА, создавалась координатно привязанная фотосхема, по которой, с использованием эталонных значений вегетационных индексов, хранящихся в базе знаний, дешифровались основные растительные сообщества, а также выделялись контура экотонов и антропогенно освоенных территорий. На основе полученных данных выполнялся расчет плотности и контрастности экотонов каждого природного ландшафта по зависимостям (19, 20). В заключении осуществлялись расчеты индексов биоразнообразия по зависимости (18), уровней освоения природных ландшафтов при создании природно-аграрных систем по зависимости (21), табл. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что, природные ландшафты, имеющие высокое биоразнообразие, большую сложность морфологической структуры (камовые, холмисто-моренные), могут использоваться под аграрное освоение лишь на 38–47%, а

ландшафты, имеющих низкое биоразнообразие – на 47–58%.

Литература

1. Арефьев, Н. В. Оптимизация пространственной структуры природно-аграрных систем на бассейново-ландшафтной основе / Н.В. Арефьев, Г.К. Осипов, В.В. Гарманов / Сборник трудов симпозиума «Межрегиональные проблемы экологической безопасности», 17–20 сентября 2003 г., Сумы. – С. 390–398.
2. Эколого-географическая оценка природно-ресурсного потенциала территории на основе квалиметрического анализа / Н.В. Арефьев [и др.] // Эколого-экономическое обоснование сбалансированных форм регионального развития в системе «общество-природа» (цели, задачи, решения). – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003, Ч. II. – С. 242–289.
3. Арефьев, Н. В. Основы формирования природно-аграрных систем. Теория и практика / Н.В. Арефьев, В.П. Бреусов, Г.К. Осипов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 533 с.
4. Биогеохимические основы экологического нормирования / В.Н. Башкин [и др.]. – М.: Наука, 1993. – 304 с.
5. Осипов, А. Г. Многокритериальная оценка земельных ресурсов на основе квалиметрического анализа / А.Г. Осипов // Региональная экология. – 2003. – № 1–2. – С. 31–39.
6. Осипов, Г. К. Геосистемный подход к рациональному использованию и охране земельных ресурсов при комплексном освоении территории / Г.К. Осипов, В.В. Гарманов, А.Г. Осипов // Региональная экология. – 2003. – № 3–4. – С. 87–90.
7. Роль и место дистанционно пилотируемых летательных аппаратов в информационном обеспечении систем управления / Г.К. Осипов [и др.] // Труды по материалам третьей военно-научной конференции Космических войск. Том 3. – ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – С. 472–480.
8. Осипов, Г. К. Оценка устойчивости ландшафта к мелиоративному освоению территории с использованием данных дистанционного зондирования / Г.К. Осипов, В.Г. Тимофеев // Региональная экология. – 2006. – № 3–4. – С. 99–105.
9. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: Введение : [пер. с англ.] / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
10. Ягомьяги, Ю. Э. Понятие экотона и возможность его использования при оценке территории / Ю.Э. Ягомьяги, Ю.Э. Мандер // Учен. зап. Тарт. гос. ун-та. – 1982. – Вып. 563. – С. 48–62.
11. Deriche, R. A computational approach for corner and vertex detection / R. Deriche, G. Giraudon // The International Journal of Computer Vision. – 1993. – Vol. 10(2). – P. 101–124.
12. Paragios, N. Geodesic Active Regions: A new paradigm to deal with frame partition problems in computer vision / N. Paragios, R. Deriche // Journal of Visual Communications and Image Representation, Special Issue on Partial Differential Equations in Image Processing. Computer Vision and Computer Graphics. – 2002. – № 13(1/2). – P. 249–268.
13. Smith, S. M. A New Class of Corner Fields / S.M. Smith // British Machine Vision Conference. – Leeds, Sep. Springer-Verlag, 1992. – P. 139–148.
14. Smith, S. M. SUSAN – A New Approach To Low Level Image Processing / S.M. Smith, J.M. Brady // The International Journal of Computer Vision. – 1997. – Vol. 23. – Issue 1. – P. 45–78.