

УДК 528.854

Л.А. Белозерский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТОГРАММ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются и уточняются особенности и допущения методологии моделирования гистограмм распределения яркостей изображений спутниковой съемки наземных объектов и ограниченных участков земной поверхности для решения задач обнаружения их состояний. Конкретизируются методы идентификации моделей. Демонстрируется применение модели в анализе состояний объектов космической съемки. Намечаются пути дальнейших исследований и высказываются предположения по более широкому использованию отдельных подходов.

Введение

Контроль состояний отдельных наземных объектов и участков земной поверхности, постоянно ограниченных по контролируемой площади, является современной задачей применения информационных технологий, базирующихся на результатах спутниковой съемки. Тем не менее, приходится признать, что использование классических методов сопутствующей обработки изображений сопровождается некоторыми ограничениями. Так, возможности обнаружения изменений внешнего облика интересующих объектов ограничиваются необходимостью [1, 2]:

- высокоточного совмещения их актуальных изображений с изображениями штатного состояния, хранимыми в памяти системы обработки и анализа;
- отказа от автоматически выполняемых операций в пользу интерактивного управления обработкой совмещения разновременных изображений объектов и поиска изменения их состояний;
- участия человека-оператора в задачах распознавания происходящих изменений при отсутствии возможности получения соответствующих изображений для его обучения.

В упомянутой задаче обнаружения изменений эти требования и особенности являются препятствием автоматизации. Кроме того, исследования особенностей построения систем космического контроля состояний объектов не могут обойтись без постоянного пополнения базы изображений, используемых в этих целях. Как организационно, так и экономически это представляет серьезную проблему, часто не решаемую в нужном объеме. К тому же нельзя пренебречь все варианты природных и антропогенных изменений объектов.

В то же время, как правило, в стороне от рассмотрения сопутствующих проблем остаются гистограммы распределения яркостей сопоставляемых изображений, автоматическое определение которых реализуется без проблем. Конечно, гистограммы представляют собой результат обработки, что обуславливает очевидную потерю части информации, содержащейся в изображениях. Тем не менее, часто не придается значения тому, что в целом ряде задач можно говорить о достаточности предоставляемой ими информации. Так, гистограммы играют признаковую роль для осуществления эффективного доступа к электронным хранилищам изображений [3] и поиска в базах данных при распознавании объектов [4]. В медицине они позволяют выявлять несоответствие медицинских изображений, даже если визуально сами изображения практически неотличимы друг от друга [5]. При этом для того или иного объекта в каждом его состоянии гистограммы, автоматически получаемые по спутниковым изображениям, могут являться своеобразными портретами внешнего облика [6].

Задачи обнаружения изменений состояния наземных объектов и ограниченных участков земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли являются актуальными и новыми [2], в доступных источниках им еще не уделяется достаточное внимание. Для решения этих задач настолько же новым должно быть и применение гистограмм. Сами гистограммы не требуют ни упомянутого совмещения изображений, ни ручных операций для их получения, ни обязательного участия человека-оператора в этом процессе. При решении рассматриваемых

задач многие состояния объектов, а значит и гистограммы соответствующих изображений не могут быть получены в результате спутниковой съемки в силу известных причин технического и экономического плана. Как раз здесь на помощь может прийти моделирование отражающих свойств объектов и участков, независимое от непосредственной обработки изображений и открывающее путь к получению необходимых гистограмм распределения яркостей.

1. Основы построения моделей гистограмм распределения яркостей

Если учитывать, что в число задач первичной обработки изображений наземных объектов мониторинга входит приведение их к постоянной освещенности, а сама спутниковая съемка может осуществляться при малых углах отклонения от надира [7], то для построения модели можно сосредоточиться на основных и очевидных физических и математических принципах.

Физические основы построения модели гистограммы яркостей лежат в области сегодняшних знаний о закономерностях рассеяния света и о материалах, его рассеивающих. Ясно, что в наше время не представляет принципиальных трудностей определение коэффициентов отражения любых компонент, составляющих любой наземный объект и во всех используемых спектральных диапазонах.

Для объектов технического назначения в качестве таких компонент, наблюдаемых при спутниковом зондировании, могут выступать:

- кровли цехов;
- кровли складских помещений;
- подъездные дороги;
- стоянки транспортных средств;
- емкости для хранения жидкостей;
- зеленые насаждения (трава, кусты, деревья) и т. п.

Для объектов землепользования компонентами являются:

- участки с различными видами естественной растительности;
- сельскохозяйственные угодья разного состава и назначения;
- болота;
- искусственные и естественные водоемы и т. п.

Также достаточно полно могут быть составлены перечни всех объектов и в других областях использования дистанционного зондирования Земли.

Каждая из этих компонент, кроме свойственных ей коэффициентов отражения (ρ_k), характеризуется вполне определенной площадью (S_k) в составе наблюдаемой спутником (аппаратурой съемки) поверхности всего контролируемого объекта (S_o). Последняя при известной пространственной разрешающей способности канала спутниковой регистрации определяет число разрешаемых элементов (n_o), представляемых полным количеством пикселей в изображении. Легко увидеть, что общее число пикселей при сохранении границ объекта для любых его преобразований остается неизменным.

Обращаясь теперь к гистограммам распределения яркостей объекта или его изображения, характеризующим распределение указанных пикселей по яркостям, можно связать возникающие изменения внешнего облика объекта с соответствующими перераспределениями пикселей по яркостям по сравнению с состоянием до их появления.

Каждый конкретный наземный объект мониторинга всегда уникален по площади отчуждения, количеству компонент (N_o), их площадям и отражающим свойствам. Это не может не приниматься во внимание при любом исследовании, т. е. реальный портрет объекта может быть представлен значениями N_o площадей компонент и их коэффициентами отражения аналогично для каждого спектрального диапазона:

$$S_1 - \rho_1; S_2 - \rho_2; S_3 - \rho_3; \dots; S_{N_o} - \rho_{N_o}.$$

Учитывая прямую пропорциональность между яркостью компонент объекта на изображении спутниковой регистрации и их отражающими свойствами, а также необходимость приведения значений яркостей к регистрируемому диапазону изображения, яркость k -й компоненты объекта можно представить так¹:

$$I_k = 255\rho_k.$$

Тем не менее, каждый из материалов внешних поверхностей компонент объекта нельзя считать изотропным по отражающим свойствам. Разрешаемым при съемке элементам кровли сооружения, бетонного покрытия дорог и автостоянок, травяного покрова, открытого грунта и т. п. свойственны случайные изменения яркости относительно приводимых в справочных материалах значений ρ_k . Это обусловлено большим числом факторов, не поддающихся учету.

Поэтому физически известный коэффициент отражения следует считать математическим ожиданием его значений для данного материала, а приведенную выше яркость – математическим ожиданием яркостей k -й компоненты. Не вызывает сомнений, что именно таким будет значение математического ожидания яркостей компоненты в результате экспериментальной статистической оценки, получаемой по данным многократной съемки (репрезентативная выборка изображений). В то же время закон распределения наблюдаемых яркостей каждого материала, полученный по такой выборке, согласно приведенным соображениям следовало бы считать нормальным. Аналогично распределенным является аддитивный шум, обусловленный особенностями аппаратуры съемки и каналами передачи данных и играющий роль в распределениях яркостей.

Правомерность этих очевидных особенностей следовало бы подтвердить большим объемом экспериментальных данных для различных материалов поверхности во всем диапазоне оптической регистрации. Не располагая такими возможностями, по ограниченному объему изображений можно обнаружить внешне наблюдаемое совпадение распределений яркостей однородных по материалу поверхностей с нормальным распределением, однако простое сопоставление их с нормальным законом лишь приближенно подтверждает данный вывод. Так, на рис. 1 показаны два участка зрительно однородной водной поверхности и соответствующие им гистограммы распределения яркостей.

В то же время статистическая проверка интересующей близости имеющихся в распоряжении распределений для водной поверхности в разные времена года показала, что асимметрия реального распределения яркостей (гистограммы) практически всегда незначительна и колеблется в пределах $-0,18 \dots +0,02$, а непротиворечивость аппроксимации в большинстве случаев не достигается в основном за счет положительного эксцесса, т. е. островершинности, не превышающей $0,42 \dots 1,112$. При этом многократное сглаживание исходных изображений позволяет считать, что само распределение яркостей не обусловлено одними шумами регистрации и обработки. К сожалению, доступные материалы физических исследований, объясняющие полученные результаты, на сегодняшний день отсутствуют.

Тем не менее, имеющие место отличия не препятствуют решению первоочередных задач, заключающихся в исследованиях поведения гистограмм в тех или иных изменениях отражающих свойств участков спутниковой съемки. Это позволяет временно отказаться от поиска какой-либо более полной модели. Более того, существует ряд работ (например [8, 9]), в которых рассматриваемая нормальность гистограмм подтверждается или даже считается, что имеющие место отличия не являются принципиальными.

Отсюда следует, что в качестве математической основы рассматриваемого моделирования следует принять нормальное распределение вероятностей каждой k -й компоненты для любого объекта, т. е.:

¹ Диапазон регистрируемых яркостей $\overline{0,255}$ является наиболее распространенным в спутниковой съемке.

$$f_k(I) = (\sigma_k \sqrt{2\pi})^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{I - 255\rho_k}{\sigma_k}\right)^2\right\},$$

где σ_k – среднеквадратический разброс яркостей, обусловленный флюктуациями отражающих свойств материала k -й компоненты.

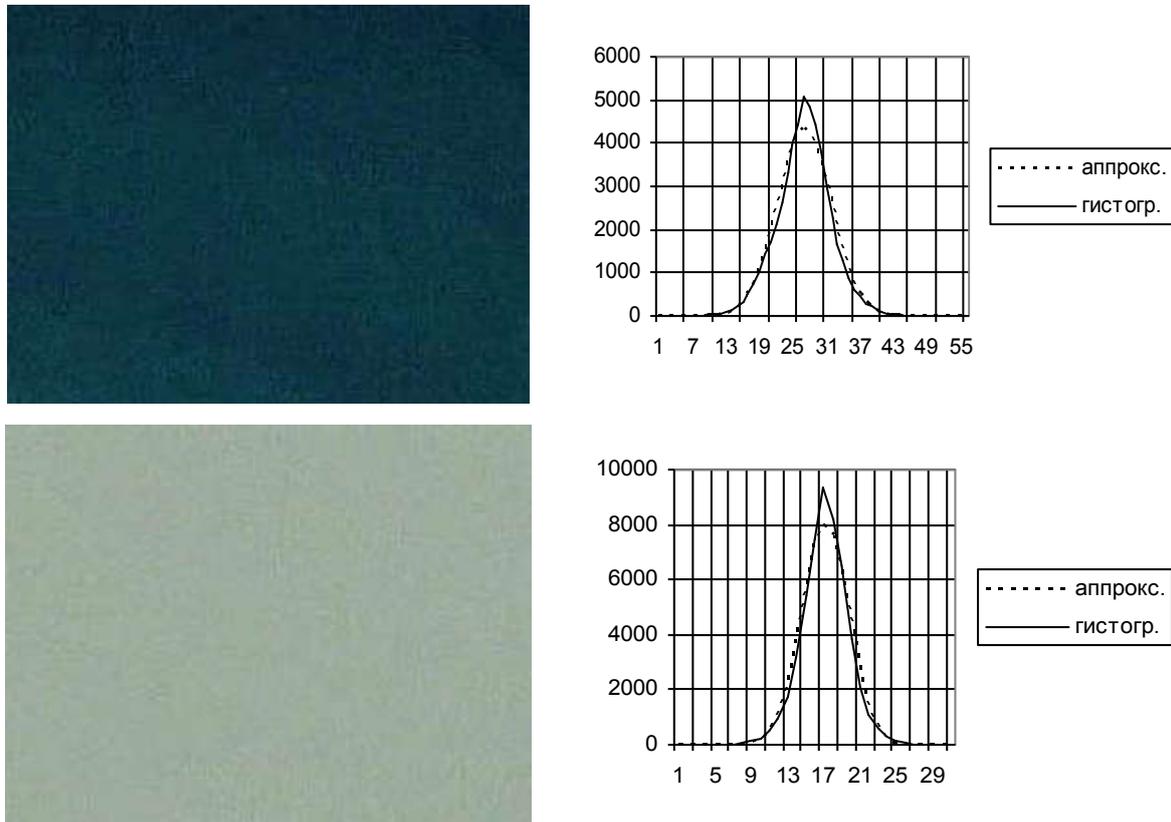


Рис. 1. Демонстрация близости распределений яркостей двух примерно равномерных по отражающим свойствам участков поверхности Земли к нормальному закону

В связи с тем что плотность распределения яркостей отдельно рассматриваемого объекта представляется суперпозицией плотностей отдельных его компонент, распределение смеси согласно [6] должно быть представлено в следующем виде:

$$f_C(I) = \sum_{k=1}^{N_O} \frac{S_k}{S_O} (\sigma_k \sqrt{2\pi})^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{I - 255\rho_k}{\sigma_k}\right)^2\right\}.$$

Наконец, принимая, что яркость обычно представляется как дискретная переменная с дискретом, равным единице, полученная плотность распределения оказывается совпадающей с распределением вероятностей попаданий на единичные интервалы диапазона, т. е.:

$$f_C(I) = p_C(I).$$

Отсюда переход к гистограмме яркостей, идентичной получаемой непосредственно по изображению, выглядит как определение целой части произведения плотности на общее число элементов пространственного разрешения снимка объекта:

$$n(I) = [p_C(I) \cdot n_o].$$

2. Попытка идентификации модели и ее корректировка

Последнее выражение является завершающим в представлении модели гистограммы любого объекта. Как всякая модель она нуждается в идентификации, несмотря на то, что физические и математические принципы, лежащие в ее основе, не вызывают сомнений. В то же время коэффициенты отражения (ρ_k), используемые при построении, требуют уточнений по сравнению, например, с таблично известными в силу случайных отличий материалов, казалось бы, одного наименования. В справочниках в лучшем случае они представляются интервальными значениями. Что же касается их среднеквадратических разбросов (σ_k), то их, с одной стороны, трудно найти в доступной литературе. С другой стороны, на реальных спутниковых снимках объектов эти разбросы могут иметь дополнительную составляющую, обусловленную электронными шумами конкретной аппаратуры регистрации.

Таким образом, коэффициенты отражения и их среднеквадратические разбросы при известных площадях компонент объектов должны быть величинами, обеспечивающими параметрическое и статистическое согласования разработанной модели с натурой.

Идентифицированная модель может использоваться для любых экспериментальных исследований изменений отражающих свойств компонент объекта. Что касается порядка идентификации, то он может быть реализован двумя путями. Первый из них основывается на том, что, располагая планом застройки и монтажа или видами землепользования конкретного объекта, т. е. площадями наблюдаемой поверхности всех его компонент, точно известными коэффициентами их отражения и предлагаемой математической моделью, а также всего одним изображением спутниковой съемки этого объекта, обеспечение идентификации достижимо в процессе выполнения такой последовательности действий:

- получение и обработка реального спутникового изображения интересующего объекта с определением гистограммы его яркостей;
- получение гистограммы яркостей заданного объекта путем моделирования этого процесса в условиях полной определенности параметров (площадей компонент, коэффициентов отражения) при известных или ориентировочно выбранных среднеквадратических разбросах яркостей σ_k ;
- корректировка среднеквадратических разбросов для достижения количественного совпадения модельной и экспериментальной гистограмм.

Второй путь – более сложный – представляет собой попытку идентификации модели гистограммы с гистограммой реального изображения объекта в условиях полной априорной неопределенности как по коэффициентам отражения, так и по их среднеквадратическим разбросам и площадям, занимаемым компонентами снимаемой поверхности. В то же время сложность не означала невозможности, так как в работе [6] была осуществлена попытка такой идентификации гистограммы, полученной для изображения произвольного объекта спутниковой съемки известной площади.

В целом приведенные в [6] оценки показали, что модель гистограммы при рассмотренном ее построении получена с потерей 2,2 % пикселей, формирующих отражающие свойства конкретного объекта, при общем их числе 35 244. Такая потеря может быть существенной для модельных исследований, связанных с природными или антропогенными изменениями объектов.

Одной из причин полученных отличий оказалось невыполнение условий нормировки плотности распределения вероятностей смеси распределений компонент. Обусловлена она была использованием тех же нормальных распределений, для которых, к сожалению, область существования – вся числовая ось случайного аргумента ($-\infty, +\infty$), в то время как диапазон яркостей ограничен нулем и максимально допустимым значением регистрируемой яркости (здесь 255).

Естественным подходом к устранению такого недостатка при сохранении предпочтения нормальным распределениям вероятностей отражающих свойств компонент объектов является использование нормальных ограниченных распределений. В результате такой замены гистограмма распределения яркостей в диапазоне 0–255 будет выглядеть следующим образом:

$$n(I) = \left[\sum_{k=1}^{N_0} A_k \cdot \frac{S_k}{S_0} (\sigma_k \sqrt{2\pi})^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{I - 255\rho_k}{\sigma_k} \right)^2 \right\} \right],$$

где в отличие от «чисто» нормальной аппроксимации распределений яркостей компонент

$$f_k(I) = A_k \cdot (\sigma_k \sqrt{2\pi})^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{I - 255\rho_k}{\sigma_k} \right)^2 \right\};$$

$$A_k = 1 / \left[\Phi_0 \left(\frac{255(1 - \rho_k)}{\sigma_k} \right) + \Phi_0 \left(\frac{255\rho_k}{\sigma_k} \right) \right];$$

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt,$$

причем [...] означает целую часть приведенного выражения.

Выполненная при подготовке статьи повторная идентификация для обновленной модели с теми же исходными данными, что и в [6], не обнаружила существенных внешних изменений имитированной гистограммы, но показала полное исключение потерь числа пикселей.

3. Возможные подходы к применению моделей гистограмм

После идентификации модель оказывается жестко привязанной к конкретному объекту, что определяет ее готовность к исследованиям. Если при этом обратить внимание на состав параметров модели, то легко составить представление о возможных задачах такого исследования. Все они связаны с предполагаемыми изменениями объектов. Это вполне очевидно отражается на оценках влияния на распределения яркостей изображений моделируемого объекта его преобразований, обусловленных

- изменением площадей, занимаемых компонентами (S_k);
- изменением отражающих свойств компонент (ρ_k) и их дисперсий (σ_ρ^2);
- замещением одной или нескольких компонент другой компонентой или другими компонентами, имеющими отличающиеся отражающие свойства.

В качестве примера на рис. 2 [6] с помощью действующей модели продемонстрированы три тематических изменения объекта, представляемого имитированными гистограммами изображения в каждом из состояний.

Осуществляемые в процессе моделирования изменения компонент объектов характеризуются четким количественным перераспределением пикселей между частями гистограммы по принципу «где и сколько убудет, столько и в равном количестве прибудет в другом месте» при одном и том же количестве пикселей в составе объекта в целом. Эти перераспределения удобно и просто оценивать по разности гистограммы, порожденной изменениями на объекте, с гистограммой исходного штатного его состояния. Так, на рис. 3 показана разность гистограммы рис. 2, б с гистограммой исходного состояния рис. 2, а.

Рис. 3 достаточно наглядно демонстрирует произошедшие изменения в диапазоне яркостей 25–100 единиц, обусловленные уменьшением коэффициента отражения компонент объекта (отрицательная разность). Факт указанного уменьшения характеризует здесь положительная разность в области малых значений яркости (0–12). Единичные изменения, проявляющиеся на рисунке случайно вдоль шкалы яркостей, порождены шумами, некоррелированными между отличающимися сеансами съемки.

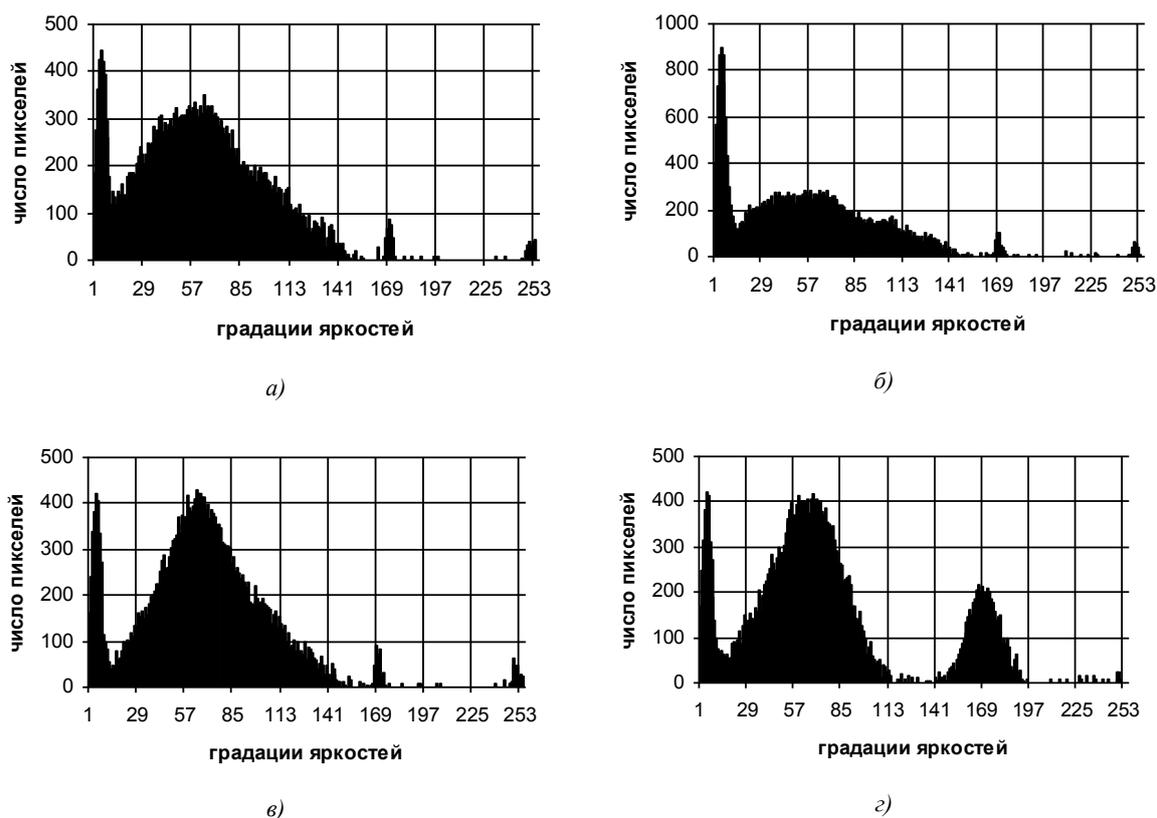


Рис. 2. Примеры возможных изменений состояний объекта и их отражение на характере гистограмм распределения яркостей: а) исходное состояние объекта; б) 20 % поверхности компоненты объекта, соответствующей песчаной почве ($\rho = 0,26$), покрытой водой ($\rho = 0,015$ с разбросом $\sigma_p = 0,004$); в) с деревьев опали листья и просвечивает песчаная почва; г) то же состояние, что и в примере в), но на кровли сооружений объекта выпал мокрый снег ($\rho = 0,7$ с разбросом $\sigma_p = 0,04$)

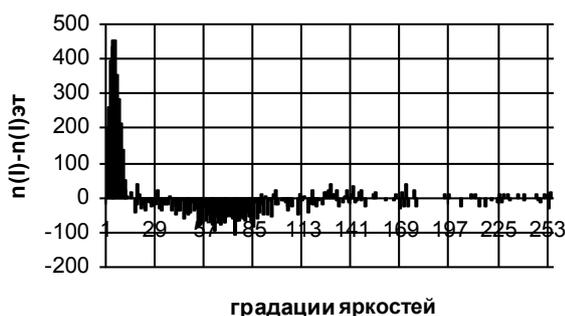


Рис. 3. Пример разности текущей и исходной гистограмм при моделировании изменений внешнего облика объекта спутниковой съемки

Приведенные результаты изучения характера изменений отражающих свойств гипотетического объекта с помощью выполненного моделирования говорят о возможности применения моделей гистограмм для понимания ожидаемых ситуаций в обнаружении и классификации их по данным спутниковой съемки в реальных условиях. Кроме того, очевидно, что рассмотренные особенности уже сегодня открывают пути для анализа реальных гистограмм разновременных спутниковых снимков заданных участков и объектов поверхности Земли. Так, при моделировании можно было проследить, что изменения гистограмм, проявляющиеся в количестве мод, в их амплитудных значениях, а также в размерах протяженных областей преобладающих

яркостных «группировок» гистограммы, являются признаками изменений внешнего облика объекта. При этом простота определения соответствующих характеристик, начиная с построения гистограммы изображения, позволяет легко автоматизировать этот процесс в отличие от интерактивной обработки самих изображений.

Одновременно анализ разности разновременных гистограмм, достаточно просто выполняемый автоматически, дает возможность оценить диапазоны градаций яркости, претерпевшие изменения. Отсюда элементарно организуется и программное выделение их непосредственно на изображении.

Наконец, решение проблем, возникающих при реализации моделирования гистограммы изображения конкретного объекта, обеспечивает доступность моделирования ситуаций опасного изменения внешнего облика объекта, которые изучить с использованием спутниковой съемки не представляется возможным.

Заключение

В статье рассмотрены и уточнены особенности и сегодняшние допущения в методологии имитационного моделирования гистограмм распределения яркостей изображений спутниковой съемки наземных объектов. Продемонстрированы возможности ее применения без получения космических снимков в задачах исследования изменений состояния внешнего облика этих объектов. Выдвинуто предложение об использовании метода анализа гистограмм для решения задач обнаружения изменений внешнего облика наземных объектов, исключающего трудности непосредственного сопоставления разновременных изображений космического зондирования.

Изложенные идеи построения и идентификации модели ориентируют на более полное изучение физических характеристик объектов, включаемых в состав контролируемых объектов с помощью спутникового дистанционного зондирования. Знание статистических характеристик отражающих свойств каждой из компонент объекта, а также вида соответствующих распределений при прочих равных условиях является основой для точной имитации гистограмм распределения яркостей. Отсюда очевидна реальность оценки любых заранее предполагаемых преобразований конкретных объектов и воздействий на них для решения практических задач обнаружения и классификации соответствующих изменений.

Список литературы

1. ERDAS Field Guide TM. Seventh edition, revised and expanded // Leica Geosystems GIS & Mapping, LLC. – Atlanta, Georgia, 2003. – 698 p.
2. Технологии тематической обработки спутниковой информации / Н.И. Мурашко [и др.] // Информатика. – 2007. – № 3 (15). – С. 91–102.
3. Байгарова, Н.С. Современная технология содержательного поиска в электронных коллекциях изображений / Н.С. Байгарова, Ю.А. Бухштаб, Н.Н. Евтеева // Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.artinfo.ru/eva/EVA2000M/eva-papers/200008/Baigarova-R.htm>. – Дата доступа: 20.11.2007.
4. Томина, Н.В. Автоматизированная обработка изображений биоткани в медицинской диагностике / Н.В. Томина, В.И. Мещеряков [Электронный ресурс] – 2004. – Режим доступа: <http://iauo.narod.ru/magazine/tomina.htm>. – Дата доступа: 10.12.2007.
5. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л.Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
6. Белозерский, Л.А. Моделирование и анализ информативности распределений яркости локальных объектов спутникового мониторинга / Л.А. Белозерский // Искусственный интеллект. – 2007. – № 4. – С. 239–252.
7. О ДЗЗ / Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.sovzond.ru/dzz>. – Дата доступа: 08.12.2007.
8. Орешкина, Л.В. Сравнение и оценка точности методов классификации многозональных спутниковых изображений / Л.В. Орешкина // Информатика. – 2007. – № 1. – С. 58–66.

9. Кашкин, В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М.: Логос, 2001 – 264 с.

Поступила 18.12.07

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: blzrsk@newman.bas-net.by*

L.A. Belozersky

**MODELING OF REMOTE SENSING IMAGE HISTOGRAMS
FOR OBJECT CHANGE ANALYSIS**

Peculiarities and assumptions of remote sensing image histogram modeling methodology for object changes detection are considered and specified. Model identification methods are discussed. Model application for satellite images is demonstrated and directions of further research are discussed.