

УДК 528.8

Е.П. Крупочкин

О новых возможностях дистанционного поиска археологических памятников по данным NDVI и результатам пространственной фильтрации мультиспектральных снимков

E.P. Krupochkin

On a New Possibilities of Remote Searching of Archeological Monuments According to NDVI and Results of a Spatial Filtration of Multispectral Pictures

Предложены новые методы поиска и изучения археологических памятников на основе данных дистанционного зондирования. Разработаны и опробованы методы компьютерного дешифрирования мультиспектральных космических снимков высокого разрешения для решения задачи массового поиска и идентификации объектов археологии. Определены индикационные характеристики для морфометрического дешифрирования курганов, которые представлены вегетационными индексами и синтезированными индексными изображениями. Предложен и реализован алгоритм линейной фильтрации (свертки), позволяющий повысить качество дешифрирования зимних снимков. С помощью математико-статистической оценки информативности снимков по разным каналам спектра установлены взаимосвязи между параметрами проективного покрытия и морфометрическими характеристиками археологических памятников, что послужит основой для их ранжирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, компьютерное дешифрирование.

ВВЕДЕНИЕ

Предметом настоящих исследований являются памятники археологии. В последнее время отмечается повышенный интерес к археологии, что связано не только с естественными потребностями человека в изучении своей истории, но и с необходимостью сохранения существующих культурно-исторических ценностей. Однако при отсутствии единой базы данных, в условиях недостаточного развития и использования в археологии новых методов и технологий отмеченная выше проблема еще долгое время будет оставаться нерешенной. В связи с этим разработка и развитие междисциплинарных научных методов представляют большой интерес и определяют актуальность подобных исследований. К таким методам относятся археолого-геоинформационное картографирование, дистанционное зондирование, информационно-картографическое моделирование и др.

The work offers new methods to search and study archeological monuments on the basis of remote sounding data. The author worked out and tested methods of computer decoding for the investigation of multispectral space pictures of high resolution for mass searching and identifying archeological objects. Indicator characteristics for borrow morpho-metrical decoding which are presented by vegetative indexes and synthesized index images are determined. The paper proposes and uses algorithm of the linear filtration (convolution), allowing to raise quality of the winter pictures decoding. By means of a mathematic-statistical estimation of pictures informational content on different spectrum channels interrelations between parameters of a projective covering and morpho-metrical characteristics of archeological monuments are defined. It will form a basis for their ranging.

Key words: remote sounding, computer decoding.

Для апробации и совершенствования предлагаемых методов и технологий большой интерес для наших изысканий представляет Чуйский бассейн, где наблюдается большое разнообразие исследованных культурно-исторических памятников разных эпох. Преимущественно это памятники скифского, гунно-сарматского и тюркского времен. Следует отметить существенный вклад бельгийских ученых Гентского университета (Р. Гууссенс, В. Гейле, Ж. Буржуа, А де Вулф и др.) в изучении памятников Юго-Восточного Алтая, которые применили для их сплошной фиксации и картографирования высокоточную GPS-съемку и панхроматические снимки Corona [1; 2].

Настоящая работа представляет собой исследования нескольких модельных площадок Чуйского бассейна, расположенных в пределах Курайской степи. В территориально-административном отношении данные площадки входят в состав Кош-Агачского района

Республики Алтай. Цель исследований – разработка и апробация методов дешифрирования мультиспектральных космических снимков высокого разрешения (до 2,01 м) для решения задачи массового поиска и идентификации археологических памятников. К задачам относятся: 1) определение прямых и косвенных демаскирующих признаков при дешифрировании мультиспектральных снимков; 2) установление параметров, влияющих на выбор индикаторов (косвенные признаки); 3) вычисление взаимосвязи между параметрами проективного покрытия и морфометрическими характеристиками археологических памятников; 4) разработка способов коррекции алгоритмов автоматизированного распознавания объектов археологии по данным многозональной съемки.

Исходные данные представлены материалами дистанционного зондирования (ДДЗ), полевыми наблюдениями, описаниями проективных покрытий и результатами GPS-съемки. Космические снимки для трех модельных площадок получены съемочной системой Ikonos. Время съемки для первой площадки – 13 мая 2001 г., для второй – 5 ноября 2002 г., для третьей – 8 мая 2000 г. Пространственное разрешение заглубленных рабочих снимков составило 2,01 м, радиометрическое – 11 бит. Для обработки доступна информация по четырем спектральным каналам в диапазоне от 0,18 до 0,8 мкм, т.е. видимый (0,48–0,66 мкм) и ближний инфракрасный (до 0,8 мкм) каналы.

Данные полевых экспедиционных исследований Курайской степи включают координаты памятников, зафиксированные выборочно с помощью GPS с погрешностью ± 5 м, ботанические описания проективных покрытий ключевых площадок, полученные в летние сезоны в течение трех лет (2006–2009 гг.).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Многoletние полевые наблюдения позволили выделить в качестве демаскирующего (индикационного) признака, определяющего конфигурацию памятников в плане/на снимке, характер проективного покрытия. Замечено, что для многих археологических объектов растительный покров по периферии образует своеобразную экологическую зону. Кроме того, разные типы растительности по-своему проявляются в видимом диапазоне спектра и тем самым создают основу для выделения по ним отдельных структурных элементов (бровка, край насыпи, западина и т.п.). Наряду с отмеченными признаками визуального дешифрирования памятников нельзя недооценивать спектральные характеристики растительного покрова, которые являются не прямыми, а косвенными демаскирующими признаками.

Последние могут служить основой для индикационных исследований памятников. При этом в зависимости от типа и технических характеристик съемочной аппаратуры также будет меняться относительная значимость дешифровочных признаков и сами признаки.

В некоторых случаях при распознавании археологических объектов на космических снимках косвенные признаки будут иметь не меньшую значимость, чем прямые. В их основе лежат связи между объектами, по которым их можно распознавать с помощью индикаторов, т.е. по другим объектам или признакам, которые достаточно четко различаются на снимке. Особенно это касается многозональных (мультиспектральных) космических снимков. Так, например, для определения индикационных факторов, позволяющих расширить возможности дешифрирования, нами была предпринята попытка оценить демаскирующие свойства растительного покрова, отражающего, предположительно, некоторые пространственные закономерности структуры и размещения археологических памятников.

Рассмотрим физико-географические особенности территории и спектральные характеристики снимка первой площадки. Район исследований представляет собой междуречье рек Актру и Корумду, эта территория на местном (алтайском) языке называется «Коол». Участок, ограниченный с западной стороны р. Корумду, с восточной – р. Актру, находится на возвышенности, образуя площадку, которая хорошо прогревается и является удобной для выпаса скота. Сегодня, как и много лет назад, здесь размещены летние пастбищные хозяйства. Местное население по-прежнему занимается скотоводством. На участке «Коол», исследованном новосибирскими дендрохронологическим и археологическим отрядами (2003–2004 гг.), было зафиксировано более 600 археологических объектов. Преимущественно это памятники пазырыкской и булан-кобинской культур поздней древности.

На исходном снимке для первой площадки в естественных цветах (RGB) различим ряд археологических объектов. В основном это группы памятников – цепочки, ориентированные по линиям С-Ю или СВ-ЮЗ, в зависимости от сезонности сооружения. Визуально, без предварительной обработки, определяются курганы с диаметром 8 м и более. Объекты менее 8 м различаются очень слабо (рис. 1). В некоторых случаях, ориентируясь на прямые демаскирующие признаки (цвет, тон, размер и др.), за объект исследования можно принять отдельно лежащие валуны или деревья, так как на снимке в RGB-спектре они плохо дешифрируются.

Однако в отличие от панхроматических снимков, мультиспектральные содержат полезную информацию, за счет которой можно улучшить дешифровочные характеристики с помощью выбора определенных каналов спектра. Причем чем больше каналов, тем шире возможности обработки снимка с точки зрения распознавания исследуемых объектов. Для оценки этих возможностей проанализируем информативность каждого канала спектра. Спектральная информация снимка Ikonos ограничена четырьмя каналами. Из

графика спектральной отражательной способности (рис. 2а) видны следующие закономерности. Для участков территории с обнажениями горных пород в синем (Blue) канале характерна значительная информационная емкость – функциональные значения коэффициента отражения изменяются от 460 до 565. Зеленый (Green) канал дает гораздо меньшие показатели – от 540 до 565. Еще более узкими диапазонами представлены красный (Red) видимый и ближний инфракрасный (NIR) каналы.

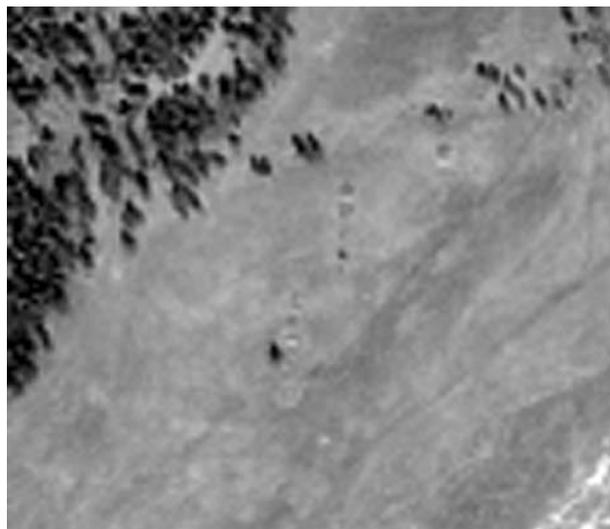


Рис. 1. Фрагмент майского снимка Ikonos, показанный в режиме «True Color» – естественный цвет

Отсюда следует, что наиболее детальные сведения об объектах могут быть получены по синтезированному изображению, созданному в синем канале (band-1) в пределах от 0,18 до 0,55 мкм.

Канал «Blue» больше подходит для дифференциации грунта от растительности, обнаружения искусственных сооружений и т.п. Анализ гистограмм сви-

детельствует о том, что этот канал меньше годится для оценок вегетации, определения типов растительности. Как показали исследования Т.Н. Чимитдоржиева и В.В. Ефременко [1], в нем вполне хорошо фрагментируются структурные горные породы (например, сланцы, фосфаты, эвопориты, эвопораты), сильно рассеивающие синий свет в этой зоне и иногда – во второй зоне (band-2), т.е. в видимом зеленом спектре. Кроме того, известно, что атмосферные эффекты вносят основной вклад в видимой части спектра именно в эту зону (более 70% рассеянного излучения) [2; 3]. Изложенное позволяет сделать вывод о том, что канал «Blue» не подходит для решения задач дешифрирования археологических памятников (курганов, насыпей, оградок и т.п.), выраженных в рельефе и не содержащих внутри контура объекта или за его пределами плотной задернованной зоны.

Рисунок гистограммы для степной незалесенной части (рис. 1б), где отмечается максимальная концентрация памятников, свидетельствует о том, что наиболее информативными каналами являются красный и ближний инфракрасный (0,66–0,8 мкм). Ввиду того, что красный канал видимого спектра (Red) содержит полосу поглощения хлорофилла, он может применяться для обнаружения и распознавания растительности. Рассматриваемая зона спектра в диапазоне до 0,7 мкм также широко используется для определения типов почв, геологических контуров и искусственных сооружений. При условии последовательного сооружения археологических объектов, связанного с переносом строительного материала (аллювиальный материал, почвы надпойменных террас, колювий и т.п.), канал «Red» может оказаться полезным для выделения археологических объектов по косвенным признакам. Например, по характеру строительного материала, который будет выделяться (отличаться) на общем фоне.

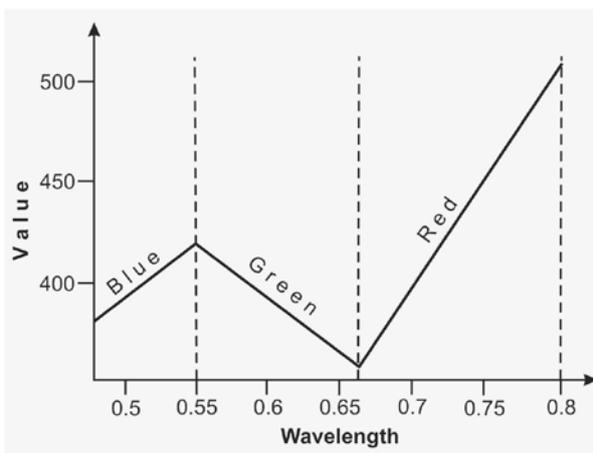
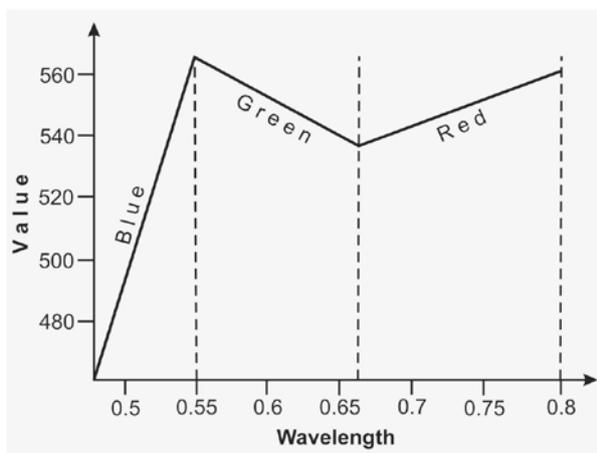


Рис. 2. Гистограммы, характеризующие спектральную отражательную способность в RGB (видимом) и NIR (ближнем инфракрасном) оптических диапазонах: А – для склонов с обнажениями горных пород, Б – для степной части с травяным покрытием. Примечание: на рисунке обозначены вертикальная ось (Value) – численные значения коэффициентов отражения, горизонтальная ось (Wavelength) – длина волны, мкм

Зона ближнего инфракрасного спектра «Nir» (см. рис. 1б) оказалась наиболее информативной. Значительное варьирование коэффициента отражения (от 350 до 550) показывает широкие возможности использования информации этого канала. Как свидетельствуют исследования П. Кронберга [4], спектр «Nir» весьма чувствителен к количеству вегетационной биомассы. Результаты прикладных исследований в области дистанционного зондирования [3–6] позволяют говорить об эффективности применения информации данного спектра для выделения по снимкам сельскохозяйственных почв и культур, оценки урожайности, определения береговых линий водных объектов на местности и др. Установлено, что максимум отраженного потока приходится на ближний инфракрасный диапазон. Фактически максимум интенсивности излучения хлорофилла от здоровой растительности получается в «красной» зоне, обычно по разнице между сигналами в 3- и 4-м каналах спектра. Отсюда можно заключить, что наиболее значимой в индикационных методах дешифрирования памятников будет информация Nir-зоны. Предположительно ее можно использовать при решении задач поиска и распознавания археологических объектов.

Рассмотрим достоверность и целесообразность отмеченного выше предположения. Как правило, современные методы оценки и типизации растительности базируются на расчетах индексов вегетации (ВИ). Как отмечают Т.Н. Чимитдоржиев и В.В. Ефременко [3, с. 50], по способу вычисления все существующие методики нахождения ВИ можно условно разделить на два класса: 1) перпендикулярные индексы, основанные на линейных комбинациях яркостей спектральных каналов с коэффициентами, полученными с помощью полевых измерений (например, PVI, WdVI, DVI и т.д.); 2) индексы-отношения, определяемые через отношения (деление) яркостей спектральных каналов, например, RVI, NDVI, SAVI и др.

Индексы первого класса относительно просты в расчетах и использовались преимущественно на ранней стадии развития дистанционных методов. Приведем схему их определения. В координатах NIR-Red (рис. 3) показаны линии с постоянными значениями ВИ, которые, как предполагается, должны совпадать с линиями изовегетации. Индексы-отношения (RVI, NDVI) графически представляют изолинии растительности с возрастающим углом наклона, в то время как изолинии «перпендикулярного» ВИ остаются параллельными почвенной линии. Способ вычисления перпендикулярных ВИ основан на нахождении ортогонального расстояния от почвенной линии до изолинии растительности, а индексы-отношения определяют наклон линии, соединяющей точку пересечения всех изолиний этого индекса (в случае NDVI это начало координат) и точку, соответствующую пикселю реального изображения (рис. 3).

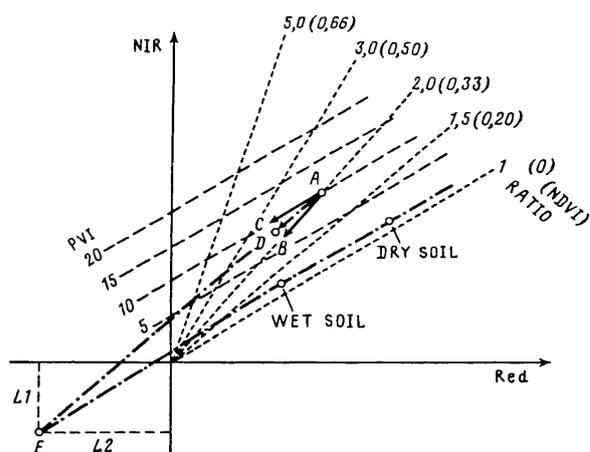


Рис. 3. Модель SAVI и связь с индексами RVI, NDVI и PVI [1, с. 51]

Сегодня активно используются несколько десятков различных вегетационных индексов. Обычно они подбираются экспериментально, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Формально расчет большей части ВИ основан на двух наиболее стабильных, т.е. не зависящих от прочих факторов, участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Активный процесс фотосинтеза ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и к большим значениям в ближней инфракрасной. Как известно, отношение коэффициентов «Red» к «Nir» позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов.

Один из наиболее распространенных индексов, который определяется через отношение яркостей спектральных каналов, – нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Вычисляется он по формуле

$$NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red} \tag{1}$$

Довольно часто NDVI определяют с помощью индекса-отношения – Ratio VI ($RVI = NIR/Red$). Отсюда выразим общий индекс вегетации, получим

$$NDVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \tag{2}$$

где Red – коэффициент отражения в красной спектральной зоне; NIR – коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне; RVI – коэффициент, определяющий отношение NIR к Red.

Однако для наших задач больший интерес представляет не расчет NDVI, а результат создания так на-

ываемого индексного изображения, т.е. изображения, полученного по алгоритму NDVI. Из трех имеющихся снимков, покрывающих территорию Курайской степи, для эксперимента был отобраны майские снимки (площадки 1 и 3). Обработка выполнялась с помощью программного пакета ENVI, функция – «Vegetation Index Calculator». Полученное в результате синтезированное изображение оформлялось в стандартной шкале NDVI, которая достаточно редко используется (рис. 4а). Более наглядный результат дают цветные шкалы (см. рис. 4б, 4в). По сравнению с предыдущим изображением (см. рис. 1), на снимке четко распознаются объекты (курганы) с размерами 5 и более метров. Обнаружились цепочки курганов, расположенные по правому берегу р. Корумду. Стали различимы отдельно расположенные древние насыпи и выкладки в центре площадок по восточной части и левому берегу р. Актру. Насыщенность тона на цветном снимке (см. рис. 4б) отражает состояние растительности – чем светлее тон, тем плотнее растительный покров и интенсивнее вегетация. Напротив, густая насыщенность (темный тон) характерна для участков земной поверхности, где растительность отсутствует либо находится в угнетенном состоянии (например, в результате выгорания). На втором снимке (см. рис. 4в) визуальнo дешифрируются морфологические признаки объектов. К ним относятся форма курганов и их внутренняя структура. Так, например, на всех трех объектах выделяется внешний контур (темно-зеленый цвет), предположительно плотно задернованный. Далее следует внутренняя часть сооружения, менее задернованная. На крайних верхнем и нижнем курганах нет плавного перехода в радиальной структуре, но можно заметить светло-синие пятна, указывающие на различия камней, из которых сложены ритуальные насыпи. Они могут быть вызваны отсутствием на поверхности лишайников у одних и наличием их у других. Кроме того, отражательные свойства темных и светлых (иногда белых) камней также различны. Провалы или западины в центральной части объектов также могут быть отображены на снимке в виде пятен (см. рис. 4б, 4в).

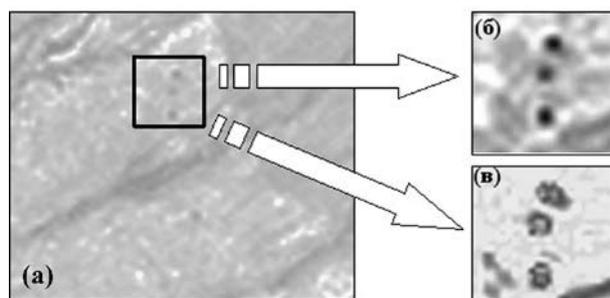


Рис. 4. Фрагмент индексного NDVI-изображения: а – в стандартной шкале, б, в – в цветных шкалах

Рассмотрим спектральные характеристики, полученные для второй площадки (ноябрьский снимок). Гистограммы, построенные для разных участков местности, отражают следующие закономерности. Для пойменной низинной зоны р. Тюте свойственны равнозначные незначительные вариации функциональных значений по всем каналам спектра (рис. 5а). Вместе с тем для преобладающей части Курайской степи наблюдаются противоположные закономерности. Как показывает гистограмма (см. рис. 5б), наиболее информативным является Green-канал видимого спектра. Зона соответствует максимальным значениям коэффициента отражения зеленой (здоровой) растительности. Довольно часто информация зеленой зоны спектра используется, например, для таксации леса. В ряде научных работ, посвященных прикладным вопросам ДЗЗ [3; 4; 6], рекомендуется применять информацию зеленого канала для определения горных пород, богатых 2-валентным (закисным) железом по сравнению с 3-валентным, и т.п. Однако в нашем случае изображение, полученное для зеленой зоны спектра, не дает максимально детальной информации по археологическим объектам с точки зрения дешифрирования. Кроме того, результаты создания индексного NDVI-изображения по ноябрьскому снимку содержат информационные «шумы», затрудняющие процесс поиска и распознавания объектов археологии (рис. 6). Таким образом, с учетом имеющихся данных для решения задачи распознавания археологических объектов предлагается другой способ, основанный на методике цифровой обработки изображения, известной как «пространственная фильтрация».

Следует отметить, что за основу был принят способ линейной фильтрации частотной области, который позволяет: а) устранять или сглаживать частотные «шумы», б) увеличивать контраст изображения за счет изменения тонопередачи. Так называемые шумы могут возникать в самой съемочной системе либо за счет грубой первичной обработки космических снимков. Контраст изображения тесно связан с понятием цветности снимка. Решение отмеченных выше задач связано, как правило, с концепцией линейной обработки изображений (метод Фурье) [7].

Проиллюстрируем использованный механизм на примере ноябрьского мультиспектрального снимка Kopos. Процесс линейной обработки, называемый сверткой изображения, состоит из умножения каждого пикселя некоторой окрестности на соответствующий коэффициент и суммирования этих произведений для получения результирующего отклика процесса в каждой точке (X_p, Y_p) . Под окрестностью чаще всего понимается матрица (математический оператор), или «маска». Если маска имеет размер m на n , то всего потребуется $m \times n$ коэффициентов для каждой позиции. Основное внимание уделяется маскам, имеющим нечетные размеры, причем наименьшим со-

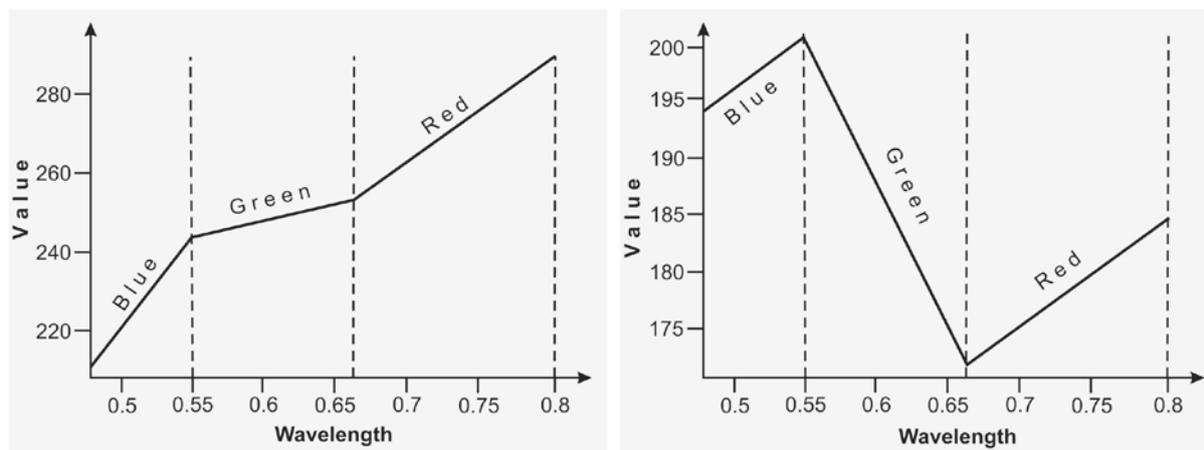


Рис. 5. Гистограммы, характеризующие спектральную отражательную способность в RGB (видимом) и NIR (ближнем инфракрасном) оптических диапазонах: А – для пойменного участка р. Тюте, Б – для степной части с травяным покрытием. Примечание: на рисунке обозначены вертикальная ось (Value) – численные значения коэффициентов отражения, горизонтальная ось (Wavelength) – длина волны, мкм

держательным размером маски считается размер 3×3. Преимущественное обращение с масками нечетных размеров является вполне обоснованным, поскольку в этом случае у маски есть выраженная центральная точка, т.е. это удобно для расчетов.

Пусть P – исходное изображение (см. рис. 7а). Каждый пиксель содержит численные значения, соответствующие начальному уровню обработки исходного снимка. На первой стадии происходит совмещение маски с началом координат изображения (см. рис. 7б). Далее процесс свертки заключается в последовательном перемещении центра фильтрующей маски от точки к точке изображения. При этом в каждой точке (x, y) откликом маски (P') является сумма произведений коэффициентов фильтра и соответствующих пикселей оператора, которые накрываются фильтрующей маской:

$$P' = P + H \times (x, y) = \sum_{i=1}^n \times \sum_{j=1}^n P(ij) \times H(i + x, j + y), \quad (3)$$

где P – исходное изображение (двумерный массив); P' – обработанное изображение; H – функция, выполняющая обработку. Для подчеркивания границ дешифрируемых объектов и уменьшения «шума» экспериментальным путем были определены маски с численными значениями:

для первой задачи $H_1 = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +5 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$,

для второй $H_2 = \begin{vmatrix} +1 & +1 & +1 \\ +1 & +8 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{vmatrix}$. Таким образом,

для текущей позиции (см. рис. 7б) при использовании H_1

$P_{22} = [(-1 \cdot 0,06) + (-1 \cdot 0,11) + (-1 \cdot 0,13) + (-1 \cdot 0,1) + (0,12 \cdot 5) + (-1 \cdot 0,14) + (-1 \cdot 0,11) + (-1 \cdot 0,1) + \dots] [\dots + (-1 \cdot 0,11)] = -0,02$,
 $P_{23} = [(-1 \cdot 0,11) + (-1 \cdot 0,13) + (-1 \cdot 0,14) + (-1 \cdot 0,12) + (0,4 \cdot 5) + (-1 \cdot 0,13) + (-1 \cdot 0,1) + \dots] [\dots + (-1 \cdot 0,11) + (-1 \cdot 0,12)] = -0,11$. Для всех остальных пикселей, соответствующих центральным элементам предлагаемого оператора, расчеты выполнялись аналогично по заданному алгоритму. В результате получены новые значения для первой (см. рис. 7в) и второй (см. рис. 7г) масок.

Автоматизация всех вычислений обеспечена открытой архитектурой ПК ENVI и использованием функции «Filter».

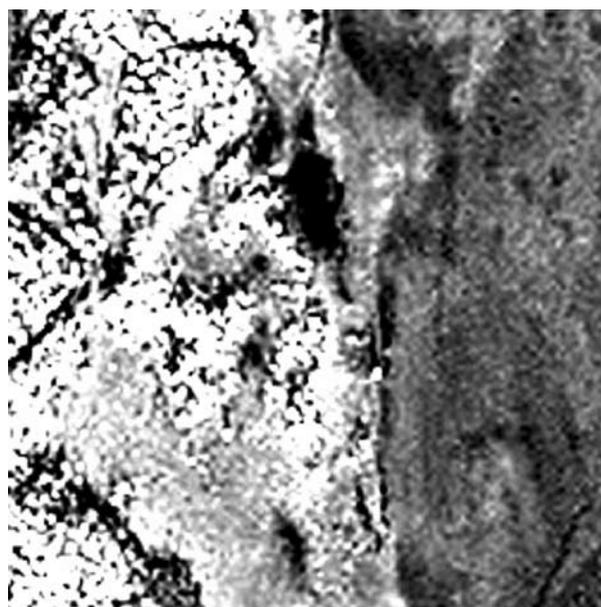


Рис. 6. Фрагмент NDVI-изображения, полученного в результате обработки ноябрьского снимка

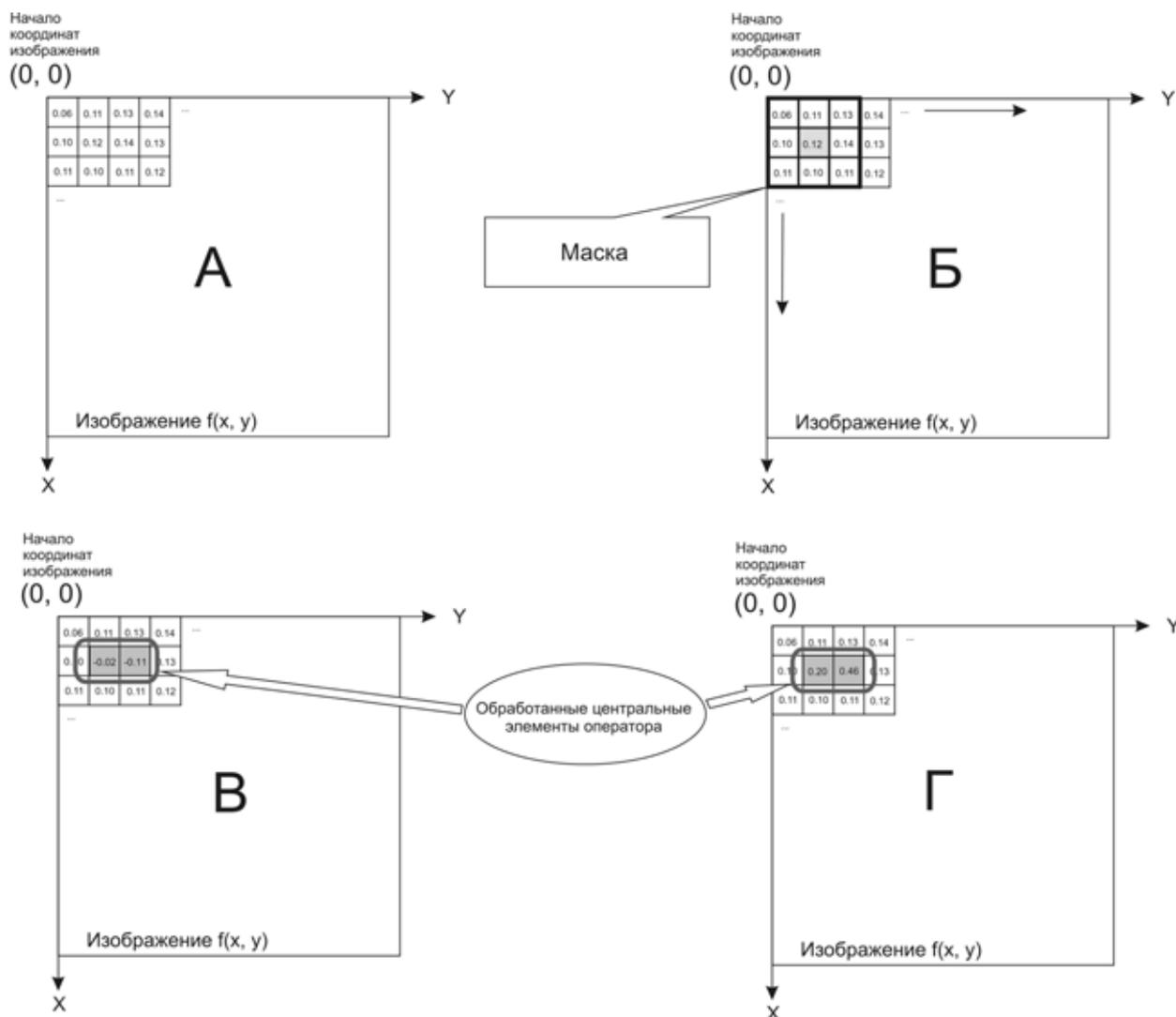


Рис. 7. Схема цифровой обработки изображения по принципу свертки. Фрагмент снимка Ikonos

С технологической точки зрения отмечают, как правило, два тесно связанных принципа линейной пространственной фильтрации. Первый – это корреляция, второй – свертка. Корреляция состоит в прохождении маски по изображению f , свертка делается аналогично, но маска поворачивается на 180° перед прохождением по изображению f . Однако при условии использования симметричных масок очевидно, что корреляция и свертка покажут одинаковые результаты (рис. 8).

Для определения степени информативности полученных снимков, а также для оценки возможностей изучения структуры и формы археологических объектов были сняты численные значения индекса $NDVI$ по 30 ключевым объектам. По каждому объекту информация считывалась по двум направлениям – С-Ю и З-В. При этом учитывалась информационная емкость каналом видимого спектра (псевдорежим) и собствен-

ные численные значения индекса $NDVI$. Полученные в результате статистической обработки графики (см. рис. 6) позволили: а) установить диапазон полезных значений индекса, б) обнаружить закономерности статистического распределения показателей в зависимости от конфигурации памятников.

Так, например, установлен диапазон численных значений индекса (от $0,4 \times 10^{-2}$ до 0,2), характеризующего состояние растительности в пределах курганов. Это позволило значительно сократить диапазон возможных значений для автоматического поиска и выделения археологических объектов по космическим снимкам.

Статистический анализ распределения $NDVI$ и коэффициентов пространственной фильтрации показал неплохие возможности анализа формы и структуры археологических объектов по многозональным снимкам.

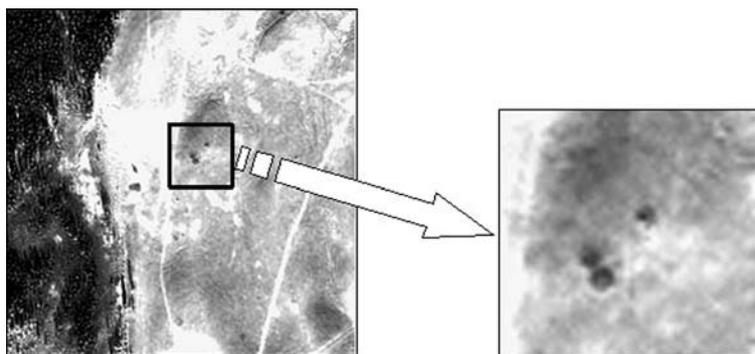
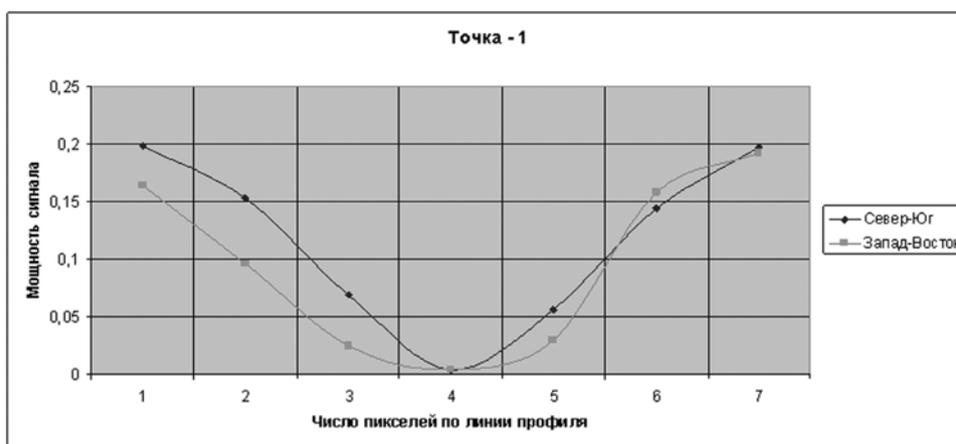


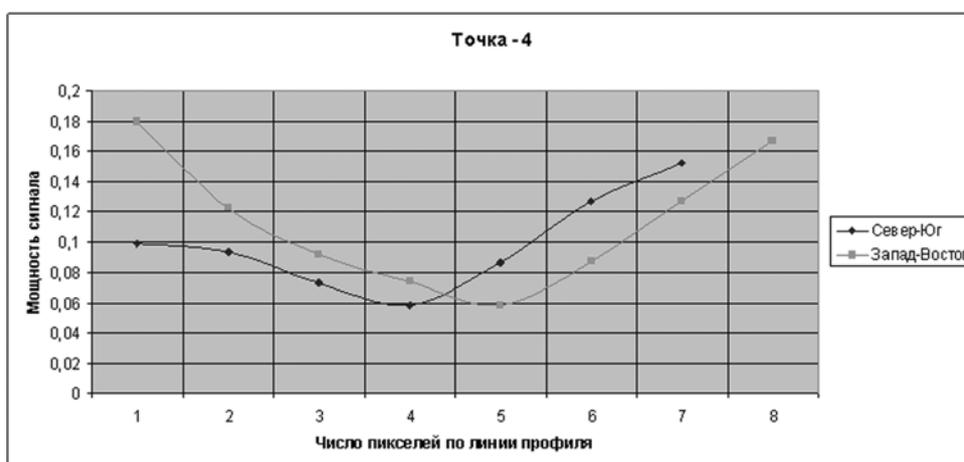
Рис. 8. Результат обработки ноябрьского снимка с помощью процедуры «пространственная фильтрация» – трехкратное увеличение. Примечание: представлен фрагмент изображения территории Курайской степи (тот же, что и на рисунке 6)

Графики построены на основе численных значений пикселей, считанных по двум перпендикулярным направлениям (север-юг и запад-восток), проходящим через центры объектов (рис. 9). Как видно из графиков, чаще всего курганы имеют три контура – центр, край насыпи и периферию, что свидетельствует о различном состоянии растительности или указывает на разнородность материала. Кроме того, несколько объектов выпадают из общего тренда. Кривая распределения на таких объектах показывает

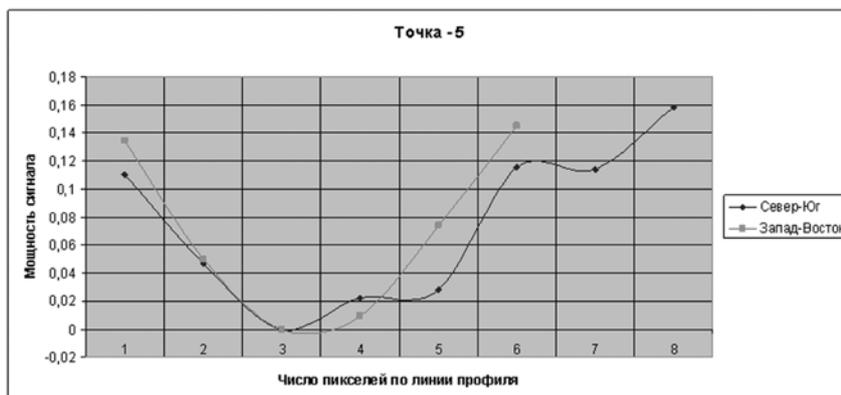
в центре не насыпь, а западину. Это говорит о том, что курган был разграблен или не восстановлен после раскопок. Корреляционный анализ статистических данных показал возможность определения формы объектов (см. рис. 9). Высокие значения корреляции подтверждают предположение о том, что курган имеет правильную геометрическую форму в виде окружности. Низкие или средние значения указывают на трансформацию насыпи, что является результатом разграбления.



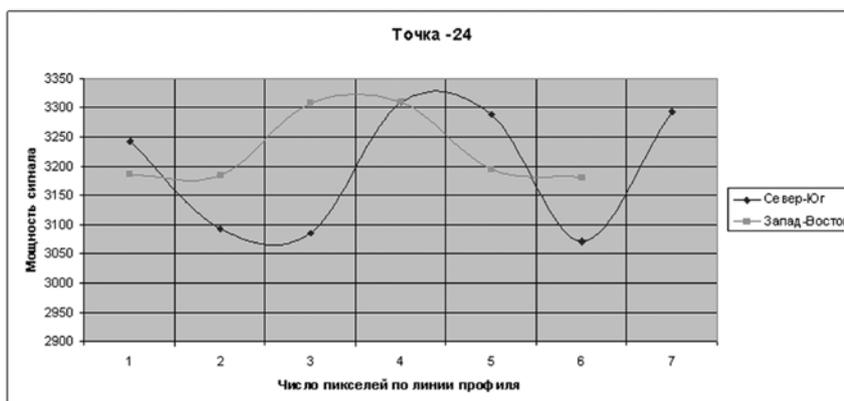
Точка 1. $r = 0,94$



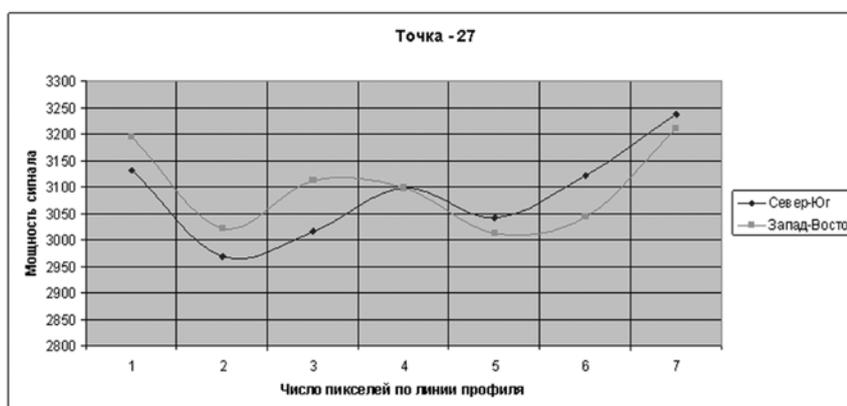
Точка 4. $r = 0,35$



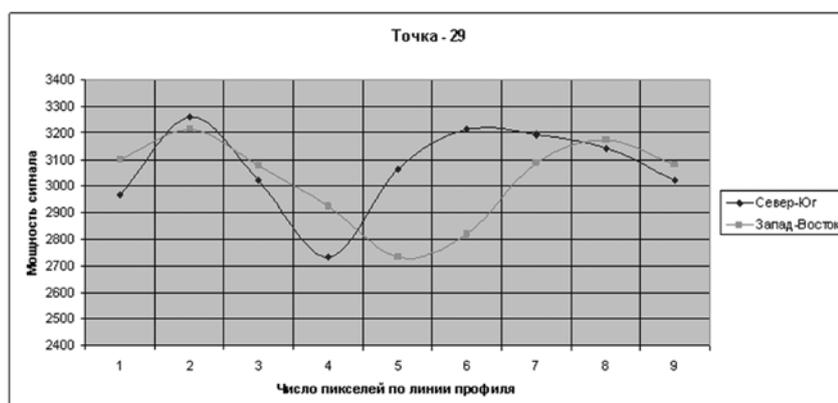
Точка 5. $r = 0,94$



Точка 24. $r = 0,15$



Точка 27. $r = 0,73$



Точка 29. $r = 0,23$

Рис. 9. Графическое представление результатов статистической обработки информативности снимков: 1) индексного снимка NDVI (точки 1, 4, 5), 2) синтезированного снимка (получен в результате линейной свертки) (точки 24, 27, 29)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ спектральных каналов снимков Ikonos позволил сделать следующие выводы. Для летнего снимка голубая зона не подходит для решения задач дешифрирования археологических объектов, выраженных в рельефе, частично либо полностью задернованных. Но, возможно, будет полезна для поиска и идентификации памятников с определенными горно-геологическими и геоморфологическими условиями местности. Это, например, участки территории с открытым слабозадрнованным грунтом или скальными обнажениями, на которых могут быть обнаружены древние курганные насыпи, сложенные из крупного необработанного или слабо обработанного материала. Известно, что такие насыпи существуют в Чуйском бассейне в долинах мелких рек, где нет подходящего аллювиального материала (долины рек Уландрык, Сары-Габо и др.).

Гистограммы отражательной способности, полученные для разных участков местности, свидетельствуют о том, что наиболее информативными каналами являются красный и ближний инфракрасный. При создании разносезонных археологических сооружений, связанных с переносом материала, красный канал может оказаться полезным для распознавания объектов по косвенным признакам. Например, по характеру строительного материала, который будет выделяться на общем фоне.

Однако для индикационных исследований памятников (например, на основе данных о проективном покрытии) красная зона по сравнению с зоной ближнего инфракрасного спектра будет иметь меньшую значимость. В результате исследований выяснилось, что *NIR*-канал оказался наиболее информативным. Изображение, полученное в результате обработки по алгоритму *NDVI*, было более качественным, чем исходный снимок. На «индексном» летнем снимке достаточно четко распознаются объекты (курганы) с размерами 5 и более метров. Легко читаются цепочки курганов, расположенные по правому берегу р. Корумду. Стали различимы отдельно расположенные древние насыпи и выкладки в центральной части «Коол», а также по левому берегу р. Актру. Интенсивность цвета на полученном снимке в шкале «Green/White linear» отражает состояние растительности. Чем светлее тон, тем плотнее растительный покров и интенсивнее вегетация. В итоге отметим, что главным преимуществом индекса *NDVI* является относительная простота его получения и широкий диапазон решаемых задач. И, что особенно важно для задачи дешифрирования, результатом расчета *NDVI* могут быть не просто индексы, но и карты. Вместе с тем индексные *NDVI*-снимки могут служить основой индикационного дешифрирования, т.е. дешифриро-

вания на основе косвенных признаков (например, по характеру растительного покрова).

При обработке зимнего (ноябрьского) снимка поиск объектов по *NIR*-каналу оказался неэффективным. Для решения данной задачи был предложен способ пространственной фильтрации частотной области, который позволил устранить и сгладить частотные «шумы», а также увеличить контраст изображения. Наглядно показана работа алгоритма линейной фильтрации – свертки изображения, состоящего из умножения каждого пикселя некоторой окрестности на соответствующий коэффициент и суммирования этих произведений для получения результирующего отклика процесса в каждой точке. При этом экспериментально найдены и практически обоснованы размеры математического оператора (маски) и численные значения массива.

Как показали проведенные эксперименты, на основе индикационных (косвенных) демаскирующих признаков растительности можно автоматически получить выборку, соответствующую классу поиска (например курганы). Вместе с тем результаты автоматического поиска археологических объектов выявили относительную ошибку, составляющую не менее 30%.

В дальнейшем для повышения точности необходимо совершенствование алгоритмов поиска. Возможно, решением проблемы станет практическая апробация теории, основанной на свойствах марковского случайного поля с гиббсовским распределением вероятностей. Результаты экспериментов [8; 9], полученные на базе данной теории, уже положительно зарекомендовали себя при решении задачи моделирования характеристик визуального содержания для поиска объектов в каталогах космических снимков.

Анализ статистического распределения информации, считанной по индексным изображениям (обработанным снимкам), показывает возможность ранжирования курганов и относительного датирования. Для географии прежде всего это важно с точки зрения реконструкции систем древнего расселения, моделирования климатических условий и факторов природной среды, изучения системы хозяйственного освоения территории. Как представляется, на следующем уровне исследований необходима разработка поправочных коэффициентов и алгоритмов, позволяющих выполнять автоматизированный поиск и распознавание памятников с ошибкой не выше 15–20%. Однако этого можно добиться с учетом результатов, которые были получены в настоящей работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда «Human Capital Foundation».

Библиографический список

1. Bourgeois J., Megansk M. Aerial photography and archaeology. – Ghent, Belgium: A century of information. – Academia Press, 2005.
2. Goossens R., De Wulf A., Bourgeois J., Gheyle W., Willems T. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains // J. of archaeological science. – 2006. – №33.
3. Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исследование Земли из космоса. – 1998. – №3.
4. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геомагика. – 2009. – №3.
5. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии : пер. с нем. – М., 1988.
6. Абросимов А.В., Черепанов А.С. Обработка гиперспектральных изображений в ПК ENVI // Геопрофи. – 2007. – №2.
7. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. – М., 2006.
8. Боечко К.А., Поляков А.А., Яковченко С.Г. Идентификация антропогенно измененных ландшафтов на территориях проектируемых водоохранных зон с использованием данных дистанционного зондирования // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, №1.
9. Боечко К.А., Ковалевская Н.М. Оценка характеристик запросов для содержательного поиска в базах данных космических изображений // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, №2.