

Международный опыт использования цифровых моделей рельефа при автоматизированном анализе данных дистанционного зондирования

и. в. флоринский

Цифровые модели рельефа (ЦМР) [5] и методы их количественного анализа широко применяются в ландшафтных исследованиях [6]. В частности, одним из направлений повышения информативности и объективности тематического дешифрирования является использование методов интегрированного автоматизированного анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и ЦМР. В настоящей работе приведен краткий аналитический обзор международного опыта применения ЦМР при автоматизированном анализе ДДЗ.

Теоретические аспекты интегрированного анализа ДДЗ и ЦМР. Основной причиной внедрения в практику ландшафтных исследований методов этого анализа стало осознание того, что: для удовлетворительного дешифрирования изображений природных объектов, явлений и процессов не всегда достаточно одних ДДЗ; рельеф влияет на формирование изображения; геометрия земной поверхности определяет сложность распределения яркостных и спектральных характеристик ландшафта, что повышает вероятность появления ошибок при дешифрировании; учет априори известных связей между характеристиками рельефа и другими компонентами ландшафта позволяет существенно повышать качество тематического дешифрирования [31, 19].

При автоматизированном анализе ДДЗ используются ЦМР, полученные в результате цифрования горизонталей топографических карт, применения стереотопографического метода и наземной съемки. Метод составления ЦМР выбирается в зависимости от требуемой точности исследования, а сама модель должна быть построена по квадратной сетке узловых точек. Допускается пересчет нерегулярных ЦМР в регулярные с помощью известных интерполяционных алгоритмов [33]. Обязательны сопоставимость плановой точности ЦМР и ДДЗ, их разрешающей способности и общая система координат [21, 18]. Именно несопоставимость точностных характеристик ДДЗ и результатов наземных почвенных, геологических и других тематических съемок сдерживает их использование при автоматизированном дешифрировании [21].

При анализе ДДЗ применяются цифровые модели высоты (h), крутизны (G), экспозиции склонов (A), горизонтальной (Kh), вертикальной (Kv) и средней (H) кривизны земной поверхности [13]. Эти топографические характеристики локальны. Их значения определяются в результате анализа высоты малой окрестности каждой точки поверхности [6].

Использование цифровых моделей локальных топографических величин связано с тем, что последние определяют ряд процессов, влияющих на развитие ландшафта, и фиксируют некоторые геологические структуры. Так, высота в горных районах определяет вертикальную зональность почв и растительности, может служить индикатором интенсивности новейших тектонических движений и устойчивости горных пород к выветриванию. Крутизна и экспозиция склонов являются топографическими предпосылками соответственно скорости и направления потоков вещества, перемещающихся по земной поверхности под действием гравитации, контролируют инсоляцию, микроклимат, интенсивность испарения осадков и таяния снега, некоторые свойства почвенного и растительного покрова. Горизонтальная и вертикальная кривизна земной поверхности определяют конвергенцию и относительное замедление потоков вещества соответственно, в связи с чем контролируют влажность почв, их pH , мощность горизонтов, содержание органического вещества, другие свойства почвенного покрова. Совместное использование данных о горизонтальной и вертикальной кривизне поверхности позволяет выделять зоны денудации, транзита и аккумуляции потоков. Средняя кривизна поверхности дает представление о конвергенции и относительном замедлении потоков с равными весами и может иметь почти функциональную связь с влажностью почвы [6].

При анализе ДДЗ целесообразно применять цифровые модели аккумуляционной кривизны поверхности (Ka) [35, 15], нелокальных топографических величин, в частности площади водосборного бассейна (СА), и некоторых комбинаций локальных и нелокальных характеристик рельефа, например

индексов влажности (WI) и мощности потоков (SI) [38]. Совместное использование данных об аккумуляционной и средней кривизне поверхности позволяет количественно описывать интенсивность процессов денудации, транзита и аккумуляции потоков вещества [35, 15]. В отличие от локальных величин площадь водосборного бассейна, индексы влажности и мощности потоков отражают относительное положение участка в ландшафте [6] и поэтому могут более точно определять топографические предпосылки поверхностного и внутрипочвенного массопереноса [27, 38]. Несмотря на очевидную полезность цифровых моделей Ka, CA, WI и SI, они еще не нашли своего применения при автоматизированном анализе ДДЗ.

К основным направлениям интегрированного анализа ДДЗ и ЦМР относятся оптимизация дешифрирования изображений природных объектов, явлений и процессов; исследование влияния рельефа на свойства других компонентов ландшафта; изучение и корректировка топографического эффекта, под которым понимается различие значений сигналов, отражаемых наклонными и горизонтальными участками поверхности, т. е. функция ориентации участков поверхности относительно источника излучения и приемника отраженного электромагнитного потока [23]; трансформирование снимков.

В дешифрировании получили развитие детерминистские и вероятностные подходы [21, 31, 19]. Детерминистские подходы включают стратификацию изображений до начала дешифрирования и сортировку его результатов. Под стратификацией понимается разбивка анализируемого снимка на участки, соответствующие определенным интервалам значений геометрических характеристик рельефа, влияющих на свойства предмета дешифрирования. Стратификация позволяет выявлять различия участков с одинаковыми спектральными характеристиками и тем самым повышать степень неоднородности исходных данных, что обеспечивает полноту дешифрирования. Благодаря алгоритмической простоте метод высокоэффективен и широко используется [17, 36, 16, и др.], но требует определения в каждом случае топографических характеристик, влияющих на свойства предмета дешифрирования, и шагов квантования значений этих характеристик, удовлетворяющих выявлению таксономических различий [21, 18]. Сортировка результатов дешифрирования, выполненная на основе анализа ДДЗ, в алгоритмическом плане сходна со стратификацией, но обработке подвергаются выделенные таксоны предмета изучения [21].

Среди вероятностных подходов наиболее прост метод «логического канала», когда вместе с каналами спектральных данных при дешифрировании используется тканалов топографических характеристик [40]. Однако механическое увеличение каналов может не только не улучшить результаты интегрированного анализа ДДЗ и ЦМР, но и внести новые проблемы классификационного и экономического характера [21, 18].

Другой метод заключается в изменении правила максимальной вероятности, т. е. присвоении различных априорных вероятностей разным таксонам предмета изучения до начала дешифрирования [21]. Использование его также требует знания зависимости свойств объекта дешифрирования от характеристик рельефа. Однако правило максимальной вероятности предполагает существование гауссова распределения анализируемых данных, что для топографических величин неочевидно [13, 39]. (В альтернативном методе [31] гипотеза гауссового распределения топографической информации не

используется.) Примечательно, что при вероятностных подходах анализа ДДЗ с применением ЦМР точность геоботанического и геоморфологического дешифрирования повышается на 25—45 % [39, 18, 19, 30].

Исследование влияния рельефа на свойства других компонентов ландшафта предполагает проведение статистического анализа ЦМР и ДДЗ [9, 45, 26, 28, 7, 12, 1, 2, и др.]; цель которого установить закономерности развития ландшафта; результаты анализа могут быть использованы при дешифрировании. Так как в различных климатических и геологических условиях рельеф по-разному влияет на дифференциацию ландшафтов, результаты подобных работ носят региональный характер и отражают тенденции влияния рельефа на свойства других компонентов ландшафта.

Топографический эффект наиболее сильно проявляется на геоизображениях с контрастным рельефом [44], полученных при низкой высоте Солнца [23]. Ошибки дешифрирования, возникающие из-за топографического эффекта, могут быть сокращены в результате корректировки снимка путем уменьшения интервала значений яркости и повышения вероятности правильного выделения таксонов предмета изучения [34, 39, 26, и др.].

Для оценки топографического эффекта в камеральных условиях используются карты отражательной способности, реализующие различные модели отражения света от поверхности [20]. Входными параметрами для их построения служат ЦМР и углы, определяющие положение Солнца на небесной сфере (азимут и высота). Статистическая обработка снимков и карт отражательной способности позволяет более точно оценить топографический эффект, но для этого необходимо правильно выбирать адекватную отражательную модель. Анализ снимков Landsat и SPOT показал, что возможности ламбертовской модели достаточно ограничены [23, 22], а использование произвольно выбранных моделей отражения может осложнить дешифрирование [22]. При выборе модели следует руководствоваться высотой Солнца над горизонтом, при которой велась съемка, и характеристиками ландшафта.

А. Джонс с соавторами [22] относят к их числу некоторые свойства растительного покрова. В то же время они установили, что изменения значений яркости на снимках Landsat в большей степени определяются крутизной и экспозицией склонов, чем плотностью растительного покрова, видовыми различиями, возрастом и размером деревьев [41, 44]. Для снимков ледников можно предположить зависимость яркости от горизонтальной, вертикальной и средней кривизны земной поверхности. Радиолокационные изображения горных районов формируются также преимущественно под влиянием рельефа [45, 11]. Корректировка изображения из-за влияния топографического эффекта обеспечивается, например, при делении значений яркости каждого пикселя снимка на значения яркости соответствующих пикселов карты отражательной способности [23] или при разности этих значений [11].

Трансформирование снимков (получение ортофотоснимков) с использованием ЦМР предполагает определение смещения каждого пикселя в соответствии со значением высоты в данной точке поверхности и геометрическую корректировку изображения. ЦМР применяются для трансформирования как спектральных [26], так и радиолокационных [11] снимков.

В качестве вспомогательного приема при тематическом дешифрировании и отображении его ре-

зультатов применяется наложение ДДЗ на блок-диаграммы, генерируемые по цифровым моделям h [16, 22, 19, и др.]. У этого приема визуализации ДДЗ есть преимущества в плане восприятия информации зрительным анализатором.

Прикладные аспекты интегрированного анализа ДДЗ и ЦМР. Методы этого анализа часто применяются при геоботанических исследованиях в районах с контрастным рельефом, где зависимость растительности от топографических характеристик очевидна. Так, при составлении карт ландшафтов и землепользования в результате стратификации снимков Landsat MSS по высоте, крутизне и экспозиции склонов удалось выделить ареалы горных и долинных кустарниковых сообществ, имеющих одинаковые спектральные характеристики [36]. Аналогичный подход позволил уточнить классификацию растительных ареалов, зафиксированных на аэрофотоснимке, выполненном в диапазоне инфракрасных волн [17], и выделить ареалы альпийской и субальпийской растительности на снимках Landsat TM [16].

Для составления прогнозных карт лесной продуктивности С. Том и Л. Миллер [40] использовали линейный дискриминантный анализ снимков Landsat, цифровых моделей h , G, A и результатов геоботанического дешифрирования снимков. Точность прогноза — 97 %.

С.-Т. Ву [45] с помощью регрессионного анализа установил, что изображение горных лесов Коста-Рики на радиолокационных снимках SAR формируется под влиянием крутизны склонов, а не высоты и экспозиции. Однако использовать эти снимки для геоботанических исследований довольно сложно, так как сечение рельефа в местной геоботанической классификации не позволяет переходить к удовлетворительной классификации по признаку крутизны склонов. Автор дал рекомендации для изменения классификации растительности данной территории.

В результате анализа снимков Landsat TM, выполненных в горах Франции, и ЦМР (трансформирование, корректировка из-за влияния топографического эффекта, статистический анализ) были получены диаграммы зависимости отражательной способности некоторых видов древесной растительности различного возраста от крутизны и экспозиции склонов, и установлена связь между распределением хвойных пород и крутизной склонов [26].

На примере участка тропического леса В. Парацелла с соавторами [7] показали, что более половины типов растительности, выделяемых при автоматизированном дешифрировании снимков Landsat TM, могут быть определены с помощью кластерного анализа цифровых моделей h и G.

Д. Педдл и С. Франклайн [30] отметили слабую связь между характеристиками растительности, определяемыми по спектральным и радиолокационным изображениям, и горизонтальной и вертикальной кривизной поверхности. Вместе с тем эти виды кривизны поверхности играют существенную роль в формировании почвенного покрова [6]. Такое несоответствие объясняется локальным характером влияния горизонтальной и вертикальной кривизны поверхности на компоненты ландшафта и невозможностью в этой связи при анализе ЦМР с относительно низкой разрешающей способностью зарегистрировать зависимость растительного покрова от указанных величин. Однако при анализе крупномасштабного снимка, выполненного в диапазоне инфракрасных волн, и ЦМР с шагом сетки 3,5 м также не удалось выявить существенной связи между горизонтальной, вертикальной и средней кри-

визной поверхности, с одной стороны, и радиационной температурой ландшафта [2], с другой, контролируемой в данном случае растительностью. Понятно, что это связано с тем, что растительный покров boreальных и суб boreальных ландшафтов менее чувствителен к кривизне рельефа, чем почвы.

К. Кемпбелл [9] на основе статистического анализа данных наземной геохимической съемки, гамма-спектрометрической и магнитометрической аэросъемки, снимков Landsat и цифровых моделей h попыталась разработать метод прогноза урановой минерализации и установила значительную корреляцию высоты над уровнем моря и концентрации урана в речных осадках и поверхностных водах. Однако использовать для этих целей информацию только об одной характеристике рельефа явно недостаточно: на распределение естественных радионуклидов в ландшафте влияют горизонтальная и вертикальная кривизна поверхности и площадь водосборного бассейна [27]. Сравнительный анализ карт этих видов кривизны и данных гамма-спектрометрической аэросъемки показывает, что даже на расположенных территориях наблюдается корреляция участков повышенной плотности загрязнения ^{137}Cs с зонами относительной аккумуляции [1], для которых характеристики отрицательные значения одновременно горизонтальной и вертикальной кривизны поверхности [6].

Исследования, описанные в работах [9, 1], несмотря на допущенные в них отдельные методические недочеты, демонстрируют перспективность применения интегрированного анализа ДДЗ и цифровых моделей Kh, Kv, Ka и H для прогноза миграции и аккумуляции в ландшафте минеральных и органических веществ: анализ ЦМР позволяет установить топографические предпосылки массопереноса [35, 15], а обработка ДДЗ — корректировать прогноз. Подобное интегрирование может быть полезно для прогноза миграции и аккумуляции естественных и искусственных радионуклидов при экологическом мониторинге, нитратов при сельскохозяйственном, углеводородов при мониторинге нефтегазопроводов, инфильтрационных вод при наблюдении за гидротехническими сооружениями [15].

К. Сейдл с соавторами [34] разработали метод определения мощности снежного покрова с использованием снимков Landsat MSS, ЦМР, тематических карт и наземных метеоданных. ЦМР применялась для корректировки снимка с целью исключения влияния топографического эффекта и для классификации снежного покрова с помощью стратификации по высоте, крутизне и экспозиции склонов. Метод позволяет прогнозировать мощность снежного покрова на участках, скрытых облачностью.

Интегрированный анализ карт отражательной способности и ДДЗ может быть полезен для изучения прозрачности атмосферы и некоторых характеристик почв и грунтов [43]. Применение данных о высоте, крутизне и экспозиции склонов при дешифрировании снимков Landsat позволяет существенно улучшать результаты классификации почвенного покрова [25].

Статистическая обработка цифровых моделей h , G и A, снимков Landsat MSS, почвенных и наземных метеорологических данных помогла определить баланс испарения, инфильтрации и выпадения осадков, а также построить модель почвенной влажности одного из речных бассейнов Великобритании [12]. Для классификации почвенного покрова по степени увлажненности Д. Феранек с соавторами [14] проанализировали снимки Landsat TM и циф-

ровые модели h , A , G , Kh , Kv и пришли к заключению, что наиболее полезной оказалась информация о горизонтальной и вертикальной кривизне поверхности. Для оптимизации подобных работ целесообразно применять цифровые модели Kh , H , CA и WI . Действительно, связь средней кривизны поверхности с влажностью почвы в различных геоморфологических и климатических условиях описывается коэффициентом линейной корреляции — 0,9 [37, 3], а индекс влажности позволяет успешно моделировать влажность почвенного покрова [38]. Обоснованность же использования так называемых «маски влажности» [8] и «топографического градиента влажности» [42] представляется довольно проблематичной.

Ж. Менц [28] разработал метод составления прогнозных биоклиматических карт по результатам множественного линейного регрессионного анализа снимков НСММ, Landsat MSS, цифровой модели h и наземных метеоданных. Точность прогноза температурного стресса 94 %.

Ф. Барбери с соавторами [10] показали, что интегрированный анализ ДДЗ и цифровых моделей h и G позволяет определять зоны повышенной оползневой, обвальной и лавовой опасности. Однако составить такой прогноз можно и по результатам анализа цифровых моделей Kh и Kv без применения ДДЗ [24]. Подключение дистанционного канала целесообразно для уточнения прогноза и мониторинга техногенных объектов.

Сравнительный анализ карт отражательной способности, аэроснимков локатора бокового обзора и снимков Landsat, выполненный с целью определения их информационной ценности для геологических исследований (прежде всего для выделения линеаментов), показал, что в научном и экономическом плане предпочтительнее карты отражательной способности [32]. К. Моррис [29] отметил, что для автоматизированного распознавания разломов и складок, вычисления углов их падения и простирации также предпочтительнее карты отражательной способности, а не космические снимки. Однако, на наш взгляд, для выделения геологических структур, выраженных в рельефе, лучше применять не цифровую отмывку рельефа, а более строгий метод, основанный на расчете и картографировании горизонтальной и вертикальной кривизны поверхности [4], позволяющий кроме того определять морфологию разрывных нарушений [5]. Интегрированная обработка ДДЗ и цифровых моделей Kh и Kv может быть полезна, например, для исследования связей между разломами, с одной стороны, и почвами, растительностью и ландшафтами, с другой, для оптимизации инженерно-геологического обоснования строительства объектов повышенной ответственности (АЭС, нефтегазопроводы) и последующего их мониторинга. Для этих же целей лучше использовать цифровые модели Kh и H . Их совместный анализ позволяет выделять узлы пересечения разломов [15], к которым могут быть приурочены эпицентры землетрясений, месторождения полезных ископаемых и др.

Краткий анализ международного опыта использования ЦМР при автоматизированном анализе ДДЗ приводит к выводам:

- Основными направлениями интегрированного анализа ДДЗ и ЦМР остаются тематическое дешифрирование, исследование влияния рельефа на другие компоненты ландшафта, изучение и корректировка топографического эффекта, трансформирование снимков.

- Наиболее широко им пользуются при проведении геоботанических исследований.

- Потенциальные направления интегрированного анализа — определение и прогноз путей миграции и зон аккумуляции потоков минеральных и органических веществ, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации; изучение пространственных связей между геологическими структурами, выраженным в рельефе, и почвами, растительным покровом, ландшафтом; экологический мониторинг, в том числе техногенных объектов — нефтегазопроводов, АЭС, гидротехнических сооружений.

- Интегрированный анализ ДДЗ и цифровых моделей Kh , CA и WI целесообразно использовать при экологическом мониторинге и решении ряда задач почвоведения, гидрологии и геохимии ландшафта.

- При прогнозе почвенной влажности, зон эрозионной нестабильности ландшафта, выделении разломов достаточен анализ ЦМР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуров В. Н., Керцман В. М. Рельеф как фактор возможного перемещения радионуклидов // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. 5-й конф.; Пущино, дек. 1991. — М., 1991. — С. 17.
- Кулагина Т. Б., Мешалкина Ю. Л., Флоринский И. В. Влияние рельефа на распределение радиационной температуры ландшафта // Исслед. Земли из космоса. — 1994. — № 3. — С. 108—115.
- Курякова Г. А., Флоринский И. В., Шарый П. А. О корреляции между почвенной влажностью и некоторыми топографическими величинами // Современные проблемы географии и картографии почв: Материалы Всесоюз. конф., 24—26 сент. 1991 г.—М., 1992. — С. 70—71.
- Флоринский И. В. Визуализация линеаментов и структур центрального типа: количественные топографические подходы. — Пущино: ПНЦ РАН, 1992. — 47 с.
- Флоринский И. В., Грохлина Т. И., Михайлова Н. Л. LANDLORD 2.0: система анализа и картографирования геометрических характеристик рельефа // Геодезия и картография. — 1995. — № 5. — С. 46—51.
- Шарый П. А., Курякова Г. А., Флоринский И. В. О международном опыте применения методов топографии в ландшафтных исследованиях (краткий обзор) // Геометрия структур земной поверхности. — Пущино, 1991. — С. 15—29.
7. A Background Geobotany model applied to geologic exploration in tropical forest environments: first results from Landsat TM and DTM for the Pojoca Cu-Zn deposits, Carajas province, Brazil / W. R. Paradella, W. D. Bruce, J. K. Hornsby et al. // IGARSS'89. Remote Sensing: An Economic Tool for the Nineties. Proc. 12th Canad. Symp. Remote Sens. — 10—14 July, 1989, Vancouver. — Vol. 4. — Vancouver: IEEE, 1989. — P. 2511—2513.
8. Analysis of remote sensing geobotanical trends in Quetico Provincial Park, Ontario, Canada, using digital elevation data/T. A. Warner, D. J. Campagna, C. S. Evans et al. // Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1991. — Vol. 57, N 9. — P. 1191—1193.
9. Campbell K. Statistical techniques using NURE airborne geophysical data and NURE geochemical data // Computers & Geosci. — 1983. — Vol. 9, N 1. — P. 17—21.

10. *Displaying* morphological and lithological maps: A numerically intensive computing and visualization application//F. Barberi, R. Bernstein, M. T. Pareschi et al.//IBM J. Research & Development. — 1991. — Vol. 35, N 1/2. — P. 78—87.
11. *Domik G., Lebel F., Cimono J.* Dependence of image grey values on topography in SIR-B images//Int. J. Remote Sens. — 1988. — Vol. 9, N 5. — P. 1013—1022.
12. *Drayton R. S., Said M. A.* Improvements to the estimation of groundwater recharge using satellite and digital elevation data//Remote Sensing for Operational Applications: Techn. Cont. 15th Ann. Conf. Remote Sensing Soc. — 13—15 Sept., 1989, Bristol. — Bristol: RSS, 1989. — P. 107—112.
13. *Evans I. S.* An integrated system of terrain analysis and slope mapping//Zeitschrift für Geomorphologie. — 1980. — Suppl. Bd. 36. — P. 274—295.
14. *Feranec J., Kolar J., Krcho J.* Mapping of the surface water logging intensity of the soils by applying Landsat TM data and complex digital terrain model //Bul. Comite Fran. Cartogr. — 1991. — N 127—128. — P. 154—157.
15. *Florinsky I. V.* Flow denudation, transite and accumulation zones of the part of the Crimean Peninsula and adjacent sea bottom//Математические методы распознавания образов: Тез. докл. 7-й конф.; Пущино, 25—30 сент. 1995. — М.: ВЦ РАН, 1995. — С. 166—168.
16. *Frank T. D.* Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1988. — Vol. 54, N 12. — P. 1727—1734.
17. *Frank T. D., Thorn C. E.* Stratifying alpine tundra for geomorphic studies using digitized aerial imagery//Arctic & Alpine Research. — 1985. — Vol. 17, N 2. — P. 179—188.
18. *Franklin S. E.* Ancillary data input to satellite remote sensing of complex terrain phenomena // Computers & Geosci. — 1989. — Vol. 15, N 5. — P. 799—808.
19. *Franklin S. E.* Topographic context of satellite spectral response//Ibid. — 1990. — Vol. 16, N 7. — P. 1003—1010.
20. *Horn B. K. P.* Hill shading and the reflectance map//Proc. IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 14—47.
21. *Hutchinson C. F.* Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1982. — Vol. 48, N 1. — P. 123—130.
22. *Jones A. R., Settle J. J., Wyatt B. K.* Use of digital terrain data in the interpretation of SPOT-1 HVR multispectral imagery//Int. J. Remote Sens. — 1988. — Vol. 9, N 4. — P. 669—682.
23. *Justice C. O., Wharton S. W., Holben B. N.* Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data // Ibid. — 1981. — Vol. 2, N 3. — P. 213—230.
24. *Lanyon L. E., Hall G. F.* Land surface morphology: 2. Predicting potential landscape instability in eastern Ohio//Soil Sci. — 1983. — Vol. 136, N 6. — P. 382—386.
25. *Lee K.-S., Lee G. B., Tyler E. J.* Thematic Mapper and digital elevation modelling of soil characteristics in hilly terrain//Soil Sci. Soc. Am. J. — 1988. — Vol. 52, N 4. — P. 1104—1107.
26. *Leprieur C. E., Durand J. M., Peyron J. L.* Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1988. — Vol. 54, N 4. — P. 491—496.
27. *Martz L. W., de Jong E.* Natural radionuclides in the soils in small agricultural basin in the Canadian Prairies and their associations with topography, properties and erosion//Catena. — 1990. — Vol. 17, N 1. — P. 85—96.
28. *Menz G.* Deduction of human-bioclimatological maps by means of remote sensing data and a digital terrain model using a correlation approach // Geol. Jb. — 1988. — Vol. A 104. — P. 383—391.
29. *Morris K.* Using knowledge-base rules to map the three-dimensional nature of geological features//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1991. — Vol. 57, N 9. — P. 1209—1216.
30. *Pedde D. R., Franklin S. E.* Image texture processing and data integration for surface pattern discrimination//Ibid. — 1991. — Vol. 57, N 4. — P. 413—420.
31. *Richards J. A., Landgrebe D. A., Swain P. H.* A mean for utilizing ancillary information in multispectral classification//Remote Sens. Envir. — 1982. — Vol. 12, N 6. — P. 463—477.
32. *Schowengerdt R. A., Glass C. E.* Digitally processed topographic data for regional tectonic evaluations//Geol. Soc. Amer. Bull. — 1983. — Vol. 94, N 4. — P. 549—556.
33. *Schut G. H.* Review of interpolation methods for digital terrain models // Canad. Surveyor. — 1976. — Vol. 30, N 5. — P. 389—412.
34. *Seidel K., Ade F., Lichtenegger J.* Augmenting Landsat MSS data with topographic information for enhanced registration and classification//IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens. — 1983. — Vol. GE-21, N 3. — P. 252—258.
35. *Shary P. A.* Landsurface in gravity points classification by complete system of curvatures. — Pushchino: Pushchino Research Centre Press, 1992. — 18 p.
36. *Shasby M., Carneggie D.* Vegetation and terrain mapping in Alaska using Landsat MSS and digital terrain data//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1986. — Vol. 52, N 6. — P. 779—786.
37. *Sinai G., Zaslavsky D., Golany P.* The effect of soil surface curvature on moisture and yield — Beer Sheba observations//Soil Sci. — 1981. — Vol. 132, N 5. — P. 367—375.
38. *Soil* attribute prediction using terrain analysis/I. D. Moore, P. E. Gessler, G. A. Nielsen et al.//Soil Sci. Soc. Amer. J. — 1993. — Vol. 57, N 2. — P. 443—452.
39. *The CCRS SAR/MSS Anderson River data set*/D. G. Goodenough, B. Guindon, P. M. Teillet et al. // IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens. — 1987. — Vol. GE-25, N 3. — P. 360—367.
40. *Tom C. H., Miller L. D.* Forest site index mapping and modeling // Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1980. — Vol. 46, N 12. — P. 1585—1596.
41. *Walsh S. J.* Coniferous tree species mapping using Landsat data // Remote Sens. Envir. — 1980. — Vol. 9, N 1. — P. 11—26.
42. *White J. D., Kroh G. C., Pinder J. E.* Forest mapping at Lassen Volcanic National Park, California, using Landsat TM data and a geographical information system//Photogram. Eng. & Remote Sens. — 1995. — Vol. 61, N 3. — P. 299—305.
43. *Woodham R. J.* Using digital terrain data to model image formation in remote sensing//Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng. — 1980. — Vol. 238. — P. 361—369.

44. *Woodham R. J., Gray M. H.* An analytic method for radiometric correction of satellite multispectral scanner data // IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens. — 1987. — Vol. GE-25, N 3. — P. 258—271.
45. *Wu S.-T.* Integration of topographic data with synthetic aperture radar data for determining forest properties in mountainous terrain//IGARSS'87. Remote Sensing: Understanding the Earth as a System. Proc. IEEE Int. Geosci. & Remote Sens. Symp. — Ann Arbor, 18—21 May, 1987. — Vol. 2. — N. Y.: IEEE, 1987. — P. 1499—1503.
-