

УДК 519.8

***АЛЕШКО Роман Александрович**, ассистент кафедры информационных технологий института математики, информационных и космических технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Автор 25 научных публикаций*

***ГУРЬЕВ Александр Тимофеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий института математики, информационных и космических технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Автор 150 научных публикаций*

МЕТОДИКА ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Существующие методики тематической обработки данных аэрокосмической съемки, как правило, не предусматривают явного формализованного перехода от признаковой модели спутникового снимка к образно-знаковой модели тематической карты. В работе предлагается методика тематического дешифрирования спутниковых снимков на основе структурных моделей, представляющих взаимосвязи отдельных объектов и их свойств в сложных многокомпонентных системах «данные аэрокосмической съемки» и «наземные объекты». Результаты исследования применимы для совершенствования существующих, а также разработки новых систем и алгоритмов обработки данных космического мониторинга.

Ключевые слова: аэрокосмическая съемка, обработка данных, системный анализ, структурное моделирование, структурные взаимосвязи, геоинформационные системы, программные модели и методы.

В настоящее время для тематической обработки данных аэрокосмической съемки и идентификации параметров наземных объектов используются, преимущественно, эвристические методы, основанные на экспертных оценках. При таком подходе трудно предварительно оценить совокупную сложность задачи, т. к. неизвестна сложность решения элементарных задач определения характеристик отдельных объектов местности по снимку. Это связано с

тем, что отсутствует системность в распознавании объектов местности, нет состава определяемых объектов и их признаков, их взаимосвязей. Часть этих взаимосвязей в неявной форме выявляется в процессе эксперимента, часть вообще не берется во внимание.

Существует необходимость в создании методологических основ применения подходов структурирования систем и системного анализа для решения задач аэрокосмического

мониторинга. Предлагается решение научно-исследовательской задачи создания моделей структурных взаимосвязей объектов и свойств объектов [6] в сложных системах: «данные аэрокосмической съемки» и «наземные объекты» на примере обработки аэрокосмических снимков лесных насаждений.

При рассмотрении структуры объектов лесного фонда, категории лесных выделов выглядит следующим образом. Все земли лесного фонда делятся на нелесные (пески, дороги, болота и др.) и лесные земли. В свою очередь, лесные земли делятся на непокрытые лесом (гари, вырубки, пустыри и др.) и покрытые лесом участки.

Полная характеристика покрытых лесом участков включает такие параметры, как преобладающая порода, класс возраста, средняя высота и диаметр, класс бонитета, тип леса и др. При общей характеристике часто выделяют только преобладающую породу, класс бонитета, класс возраста, тип леса [5].

Предлагается методика [1–3] определения основных дешифровочных признаков по спутниковым снимкам, состоящая из следующих этапов:

1. Определение наиболее информативных дешифровочных признаков для выявления основных таксационных параметров.
2. Формализованное описание объектов и свойств тематического дешифрирования с использованием аппарата теории множеств.
3. Построение булевой матрицы связей свойств объектов тематического дешифрирования: основных таксационных показателей и дешифровочных признаков.
4. Построение структурных связей свойств таксационных показателей и дешифровочных признаков.
5. Разработка продукционных правил нахождения основных таксационных показателей с использованием данных спутниковой съемки.

Для обзорных снимков определение наиболее информативных дешифровочных признаков осуществлялось следующим образом. На основе значений яркости пикселей много-

спектральных спутниковых снимков Landsat-5 определялись средние значения отражения объектов в различных спектральных каналах по формуле:

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s},$$

где ρ_p – безразмерное значение отражения объекта, L_λ – значение приходящего излучения на сенсоре, d – расстояние между Землей и Солнцем (в а. е.), $ESUN_\lambda$ – среднее солнечное излучение, θ_s – угол зенита Солнца.

Здесь значение приходящего излучения на сенсоре (L_λ) рассчитывается следующим образом:

$$L_\lambda = \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max}} \cdot Q_{cal} + L_{\min \lambda}$$

где $L_{\min \lambda}$ – минимальное количество приходящего излучения, $L_{\max \lambda}$ – максимальное количество приходящего излучения, Q_{cal} – максимальное калиброванное значение (255), Q_{cal} – калиброванное значение (яркость пикселя).

Например, для таксационного показателя «класс возраста» рассчитанные значения отражения приведены в табл. 1.

Далее были построены графики спектральных кривых для каждого канала спутникового изображения (рис. 1). Производился выбор наиболее обособленных спектральных кривых на графике, которые будут наиболее четко выделяться на изображении как тематический класс.

Итак, для таксационного показателя «класс возраста» состав наиболее информативных спектральных диапазонов выглядит следующим образом: видимый зеленый, видимый красный, видимый синий, ближний инфракрасный. Значения отражения пикселей изображения в этих спектральных диапазонах и были выбраны в качестве дешифровочных признаков таксационных показателей.

Для детальных снимков состав дешифровочных признаков был выбран в ходе анализа

Таблица 1

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ОТРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ «КЛАСС ВОЗРАСТА»

	Класс возраста			
	I	II	III	IV
Канал 1	0,077	0,077	0,075	0,075
Канал 2	0,076	0,069	0,060	0,049
Канал 3	0,035	0,030	0,028	0,021
Канал 4	0,101	0,097	0,091	0,085
Канал 5	0,012	0,011	0,010	0,010
Канал 6	0,020	0,020	0,020	0,020
Канал 7	0,002	0,002	0,001	0,001

литературных источников. Дешифровочные признаки на детальных спутниковых снимках в основном связаны с характеристиками текстуры и рисунка изображения: яркость крон, тон крон, протяженность крон, густота, варьирование, вид крон в пологе, форма крон, форма проекций крон, собственная тень на кроне.

Представим структуру лесного фонда и съемочных данных в формализованном виде на основе теории множеств.

Для формализации структуры лесных насаждений введем обозначения объектов леса: Q^{IV} – лесничество, Q^{III} – участковое лесничество, Q^{II} – участок (урочище, дача), Q^I – квар-

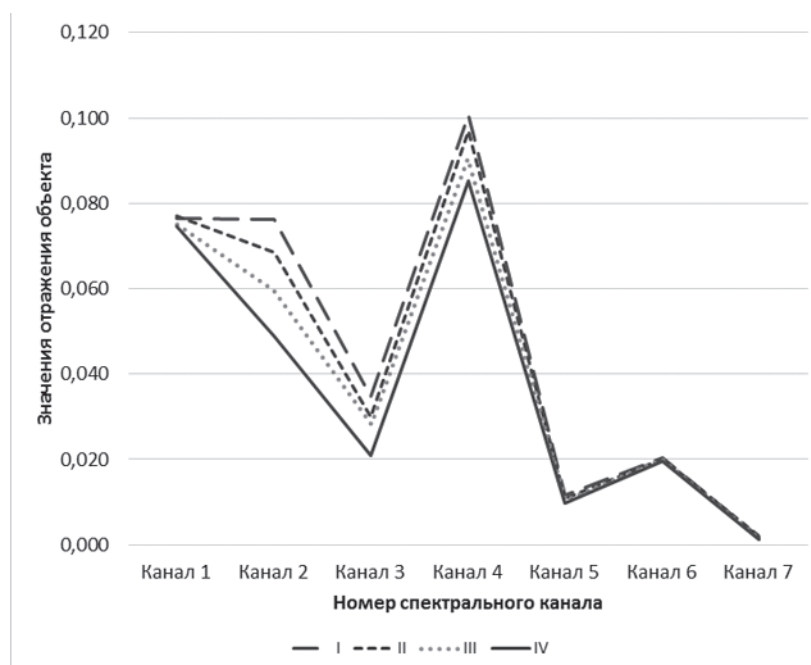


Рис. 1. Графики спектральных кривых для показателя «класс возраста»

тал, Q^0 – выдел, Q^1 – часть выдела, Q^2 – ярус, Q^3 – порода, q^4 – дерево.

Набор свойств, характеризующих лесные насаждения, имеет следующий состав: $F(Q^{IV})$ – свойства, характеризующие лесничество; $F(Q^{III})$ – свойства, характеризующие участковое лесничество; $F(Q^{II})$ – свойства, характеризующие лесной участок; $F(Q^1)$ – свойства, характеризующие квартал; $F(Q^0)$ – свойства, характеризующие выдел; $F(Q^1)$ – свойства, характеризующие часть выдела; $F(Q^2)$ – свойства, характеризующие ярус; $F(Q^3)$ – свойства, характеризующие породу; $F(q^4)$ – свойства, характеризующие дерево.

Каждая группа в свою очередь задается своим подмножеством свойств. Рассмотрим такое подмножество на примере свойств выдела. Ранее было определено четыре базовых таксационных параметра выдела, которые и выступают в качестве подмножества его свойств:

$$F(Q^0) = (F_{Л1}^0, F_{Л2}^0, F_{Л3}^0, F_{Л4}^0),$$

где $F_{Л1}^0$ – преобладающая порода; $F_{Л2}^0$ – класс бонитета; $F_{Л3}^0$ – тип леса; $F_{Л4}^0$ – класс возраста (свойства, связанные с лесными насаждениями имеют подстрочные индексы вида $Лn$, где n – порядковый номер свойства).

Для формализации структуры спутникового снимка введем следующие обозначения элементов множества: P^{-II} – сцена, P^{-I} – фрагмент сцены, P^0 – объект, p^1 – пиксель изображения.

Набор свойств, характеризующих спутниковый снимок, имеет следующий состав: $F(P^{-II})$ – свойства, характеризующие сцену, $F(P^{-I})$ – свойства, характеризующие фрагмент сцены, $F(P^0)$ – свойства, характеризующие объект, $F(p^1)$ – свойства, характеризующие пиксель изображения.

Состав свойств объектов многоспектрального обзорного снимка характеризуется совокупностью яркостных характеристик в различных диапазонах съемки. На примере объекта снимка рассмотрим подмножество характеристик свойства $F(P^0)$:

$$F(P^0) = (F_{С1}^0, F_{С2}^0, F_{С3}^0, F_{С4}^0),$$

где $F_{С1}^0$ – яркость в видимом синем спектре; $F_{С2}^0$ – яркость в видимом зеленом спектре;

$F_{С3}^0$ – яркость в видимом красном спектре; $F_{С4}^0$ – яркость в ближнем инфракрасном спектре (свойства, связанные с обзорным снимком имеют подстрочные индексы вида $Сn$, где n – порядковый номер свойства).

Ранее в работе были определены спектральные каналы, использование которых наиболее целесообразно для определения того или иного таксационного параметра. Руководствуясь этими данными и данными множества свойств выдела и объекта спутникового снимка, построим булеву матрицу $[F(Q^0) \times F(P^0)]$ для обзорных спутниковых снимков (табл. 2)

Таблица 2

БУЛЕВА МАТРИЦА ДЛЯ ОБЗОРНЫХ СНИМКОВ

	$F_{Л1}^0$	$F_{Л2}^0$	$F_{Л3}^0$	$F_{Л4}^0$
$F_{С1}^0$				•
$F_{С2}^0$	•	•	•	•
$F_{С3}^0$	•	•	•	•
$F_{С4}^0$	•	•	•	

Разработанная система связей свойств лесных насаждений и дешифровочных признаков спутниковых снимков позволяет перейти к разработке структурных моделей процесса тематической обработки изображений. Представим полученные данные в виде структурных схем, демонстрирующих связь основных таксационных показателей и дешифровочных признаков лесных насаждений на примере класса возраста. Структурные связи свойств «класс возраста» и «яркость в видимом синем спектре» представлены на рис. 2.

Введем оценочный индекс для характеристики точности определения параметра. Будем полагать, что связь между свойством снимка и свойством насаждений равна «1». Тогда связи между отдельными вариантами значений этих свойств будут составлять долю от единицы.

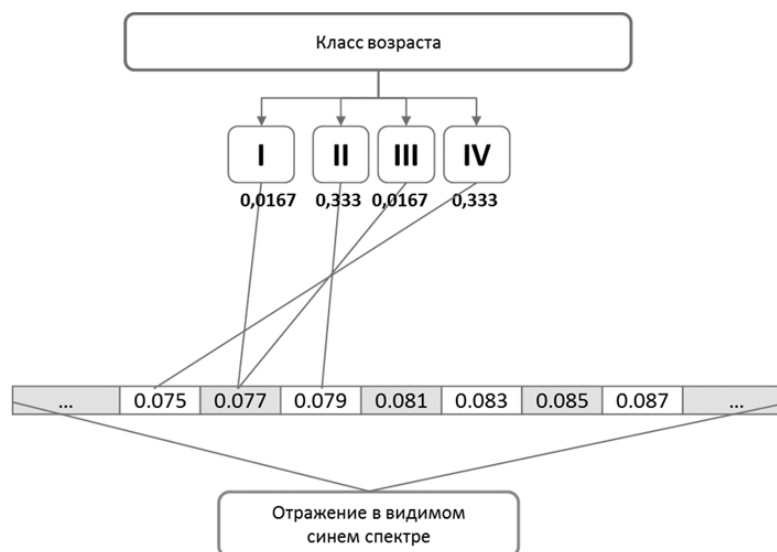


Рис. 2. Структурные связи свойств «класс возраста» и «яркость в видимом синем спектре»

Причем, точность определения будет ниже, если разные значения таксационного параметра определяются по снимку с использованием одного и того же значения дешифровочного признака.

Аналогичным образом построены структурные схемы для выделенных ранее основных таксационных показателей и всех дешифровочных признаков. Разработанные схемы можно представить в виде продукционных правил. Введем следующие обозначения используемых спектральных каналов: видимый синий – VB (visible blue), видимый зеленый – VG (visible green), видимый красный – VR (visible red), ближний инфракрасный – NIR (near infra-red). Таксационный показатель «класс возраста» обозначим AC (age class). Критерий определения таксационного параметра укажем в надстрочном индексе.

Для таксационного параметра «Класс возраста» = I правило на основе продукционной модели будут выглядеть следующим образом:

IF $VB = 0,077^{0,0167}$ & $VG = 0,076^{0,25}$ & $VR = 0,035^{0,333}$ & $NIR = 0,101^{0,25}$ **THEN** AC:= I

Используя методику, предложенную для обзорных спутниковых снимков, можно про-

анализировать структурные связи дешифровочных признаков и таксационных показателей детальных снимков. Для таксационного параметра «Преобладающая порода» = «сосна» (FS) правило на основе продукционной модели будут выглядеть следующим образом:

IF

OS = «полумесяц»^{0,2} & CFP = «округлая»^{0,125} & CF = «параболоид»^{0,1} & CV = «выпуклые»^{0,083} & VAR = «1:3»^{0,25} & CL = «1/3-1/5»^{0,2} & CH = «зеленый»^{0,2} & CB = «светло-серые»^{0,083}

THEN

FS = «сосна»,

где яркость крон – CB, тон крон – CH, протяженность крон – CL; варьирование – VAR, вид крон в полог – CV, форма крон – CF, форма проекций крон – CFP; собственная тень – OS.

Таким образом, в работе на основе анализа спектральных кривых и структурных характеристик спутниковых снимков определен состав дешифровочных признаков отдельных таксационных параметров лесных насаждений обзорных и детальных спутниковых снимков. Установлены взаимосвязи основных дешифровочных признаков и таксационных показателей

лесных территорий. Разработаны производственные правила и структурные модели процесса тематической обработки спутниковых снимков лесных территорий, позволяющие автоматизировать процесс дешифрирования таежных лесов [4]. Методические и методологические ос-

новы проведенного системного исследования на примере предметной области лесных насаждений могут быть обобщены для изучения объектов местности с применением спутниковых снимков в других сферах деятельности.

Список литературы

1. Алешко Р.А., Гурьев А.Т. Разработка методики автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования лесных насаждений // Информационные технологии в исследовании Северных и Арктических территорий: материалы науч.-техн. конф. Архангельск, 28-29 июня 2012 г. Архангельск, 2012. С. 3–9.
2. Алешко Р.А., Гурьев А.Т., Торхов С.В. Анализ структурных связей дешифровочных признаков спутниковых снимков и таксационных параметров лесных территорий // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады V Всерос. конф., посв. памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013 г.). М., 2013. С. 97–100.
3. Алешко Р.А., Гурьев А.Т., Торхов С.В. Программа автоматизированного определения основных таксационных показателей лесов Европейского Севера по данным спутниковых снимков // Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614299. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.06.2009.
4. Варфоломеев Ю.А., Гурьев А.Т., Алешко Р.А. Методические и технические аспекты космического мониторинга биоповреждения и усыхания еловых лесов // Лесн. журн. 2010. № 5. С. 149–156.
5. Павлов В.В. Структурное моделирование в CALS-технологиях. М., 2006.
6. Тематическая обработка спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей: монография / А.Т. Гурьев, Р.А. Алешко, С.В. Торхов, Д.В. Трубин. Архангельск, 2013.

References

1. Aleshko R.A., Gur'ev A.T. Razrabotka metodiki avtomatizirovannoy obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya lesnykh nasazhdeniy [Development of Methodology for Automatic Data Processing of Remote Sensing of Forest Plantations]. *Informatsionnye tekhnologii v issledovanii Severnykh i Arkticheskikh territoriy: materialy nauch.-tekhn. konf.* [Information Technologies in the Study of Northern and Arctic Territories: Proc. Sci. and Tech. Conf.]. Arkhangelsk, 28–29 June 2012. Arkhangelsk, 2012, pp. 3–9.
2. Aleshko R.A., Gur'ev A.T., Torkhov S.V. Analiz strukturnykh svyazey deshifrovочnykh priznakov sputnikovykh snimkov i taksatsionnykh parametrov lesnykh territoriy [Analysis of Structural Relations of Satellite Image Signs and Inventory Parameters of Forest Areas]. *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaystve: Doklady V Vseros. konf. posv. pamyati vydayushchikhsya uchenykh-lesovodov V.I. Sukhikh i G.N. Korovina* [Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry and Forest Management: Proc. 5th All-Russian Conf. dedicated to the memory of V.I. Sukhikh and G.N. Korovin]. Moscow, 22–24 April 2013. Moscow, 2013, pp. 97–100.
3. Aleshko R.A., Gur'ev A.T., Torkhov S.V. Programma avtomatizirovannogo opredeleniya osnovnykh taksatsionnykh pokazateley lesov Evropeyskogo Severa po dannym sputnikovykh snimkov [The Program of Automated Determination of Major Inventory Indices of Northern European Forests Using Satellite Images]. Certificate of official registration of computer program no. 2009614299. Registered in the registry of computer programs 19.06.2009.
4. Varfolomeev Yu.A., Gur'ev A.T., Aleshko R.A. Metodicheskie i tekhnicheskie aspekty kosmicheskogo monitoringa biopovrezhdeniya i usykhaniya elovykh lesov [Methodical and Technical Aspects of Space Monitoring of Biodeterioration and Drying of Spruce Forests]. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 5, pp. 149–156.
5. Pavlov V.V. *Strukturnoe modelirovanie v CALS-tekhnologiyakh* [Structured Modelling in CALS Technologies]. Moscow, 2006.

6. Gur'ev A.T., Aleshko R.A., Torkhov S.V., Trubin D.V. *Tematicheskaya obrabotka sputnikovykh snimkov lesnykh territoriy na osnove strukturnykh modeley* [Thematic Processing of Satellite Images of Forest Areas Based on Structural Models]. Arkhangelsk, 2013.

Aleshko Roman Aleksandrovich

Institute of Mathematics, Information and Space Technologies,
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russia)

Guryev Aleksandr Timofeevich

Institute of Mathematics, Information and Space Technologies,
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russia)

THEMATIC INTERPRETATION OF TAIGA FORESTS AEROSPACE IMAGES USING SYSTEMS ANALYSIS METHODS

Existing methods of aerospace survey thematic processing, as a rule, do not provide an explicit formal transition from an indicative model of a satellite image to the figurative and symbolic model of a thematic map. This paper proposes a method of satellite image thematic interpretation based on structural models representing the relationship of individual objects and their properties in complex multi-component systems "geo-data" and "ground facilities". The results can be used to improve the existing systems of space data processing and develop new ones.

Keywords: *aerospace survey, data processing, systems analysis, structural modelling, structural correlation, geographic information systems, software models and methods.*

Контактная информация:

Алешко Роман Александрович

Адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

e-mail: roman@aleshko.com

Гурьев Александр Тимофеевич

Адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

e-mail: atg6@rambler.ru

Рецензент – *Соколов Б.В.*, доктор технических наук, профессор, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН