Опыт создания геоботанической карты методом дискриминантного анализа полевых и дистанционных данных

С.Ю. Попов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: s yu popov@rambler.ru

В статье описан цикл работ по составлению геоботанической карты путем совмещения данных ДЗ, морфометрических характеристик рельефа и данных полевых описаний. В качестве основного инструмента для классификации совмещенных пространственных данных можно использовать пошаговый дискриминантный анализ (ПДА). Детально описываются и приводятся в виде блок-схемы этапы применяемого подхода. Метод применялся для создания геоботанической карты ключевого участка исследований растительности в юго-западном Подмосковье. Достоверность ПДА оценивалась по критерию лямбда, значения которого показывают его высокую достоверность. Качество ПДА составило 97,2%, что является очень высоким показателем для снимков Landsat. Показано, что с помощью ПДА возможно создавать достоверные карты наземного покрова, а оценка качества классификации не требует сравнения с другими тематическими картами. В сочетании с простотой технического получения таблиц для ПДА и самого анализа это говорит о перспективности использования этого метода для создания карт земной поверхности.

Ключевые слова: геоботаническая карта, дискриминантный анализ, данные дистанционного зондирования, цифровые модели рельефа, Landsat

Одобрена к печати: 26.11.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-25-35

Введение

Исследователями, работающими в отрасли наук о Земле, последнее время активно применяются методы многомерного анализа данных дистанционного зондирования для создания моделей земной поверхности (Кренке, Пузаченко, 2008; Козлов и др., 2008; Гаврилюк, Ершов, 2012; Сандлерский, 2013; Лисовский, Оболенская, 2014; Василевич и др., 2014; Елсаков, Поликарпова, 2015). Одним из них является метод применения дискриминантного анализа, который показал хорошие результаты при актуализации тематических карт (Кренке, 2011).

В настоящее время этот метод анализа ДДЗ развивается усилиями группы Ю.Г. Пузаченко (ИПЭЭ РАН). Мы также попробовали применить его для составления геоботанической карты. В качестве территории исследований был выбран ключевой участок территории исследований растительности в юго-западном Подмосковье (*puc. 1A*).

Район работ и классификация растительности

Рассматриваемая территория располагается в зоне хвойно-широколиственных лесов в западной части Наро-Фоминского района Московской области на границе с Калужской областью (*рис. 1*). Модельный участок находится на пологом юго-западном склоне Клинско-Дмитровской гряды, где современный рельеф обусловлен неровной кровлей коренных пород и наличием ледниковых отложений (Анненская и др., 1997). Площадь участка составляет 5466 га (примерно 6,5×8,5 км). Он был выбран для крупномасштабного картирования в рамках изучения разнообразия растительного покрова западной части Наро-Фоминского района (Беляева, Попов, 2016) (*рис. 1*).



Рис. 1. Ключевой участок: А – географическое положение; Б – топокарта ключевого участка

Для составления геоботанической карты использовался совместный анализ космических снимков, цифровых моделей рельефа и данных, полученных в результате классификации полевых геоботанических описаний, по которым выполнена эколого-фитоценотическая классификация растительности. Классификация составлялась на основе анализа 242 геоботанических описаний, собранных в период с 2013 по 2015 гг. Для хранения и анализа геоботанических описаний использовалась база данных FORDIV (Попов и др., 2014). Классификация составляна на основе принципов, предложенных Д.Н.Сабуровым (1972) с применением современных методов многомерной статистики и ординации (Смирнов, Ханина, 2004). Классификация растительности ключевого участка позволила выделить на его территории 4 формации и 10 групп ассоциаций (*maбл. 1*).

Таблица 1. Список синтаксонов ключевого участка

Формация	Группа ассоциаций	Индекс по номинальной шкале			
Березняки	Березняки разнотравные	1			
Березняки	Березняки кисличные	2			
Березняки	Березняки кислично-зеленомошные	3			
Осинники	Осинники разнотравные	4			
Ельники	Ельники влажнотравные	5			
Ельники	Ельники кисличные	6			
Ельники	Ельники кислично-зеленомошные	7			
Ельники	Ельники широкотравные	8			
Сосняки	Сосняки кисличные	9			
Сосняки	Сосняки злаковые	10			

Принципы обработки снимков

Для проведения автоматизированного дешифрирования снимков к каналам съемки подключались спектральные индексы и морфометрические характеристики рельефа. Рельеф является важной составляющей ландшафта и определяет перераспределение влаги и минеральных веществ, поэтому в сочетании с данными о земной поверхности, закодированной в космоснимках, он значительно повышает мощность анализа и возможность биологической интерпретации полученных данных. При наличии столь большого количества переменных и их значений (пикселей) задача классификации снимка решается методами многомерного анализа. Методы кластерного анализа и дихотомии по евклидовому расстоянию, реализованные в алгоритмах контролируемой классификации в пакетах ENVI и ERDAS, показали неудовлетворительный результат. Поэтому было решено классифицировать массив переменных с помощью дискриминантного анализа.

Исходная идея для создания геоботанической карты с помощью дискриминантного анализа такова (Кренке, 2011). Данные съемки Landsat, характеристики рельефа и полевых описаний объединяются в одну пространственную БД, элементарной единицей которой является пиксель. Данные классификации растительности переводятся в пиксельную форму и входят в анализ как обучающая выборка. Обучающая выборка используется в алгоритме дискриминантного анализа для проверки качества классификации и экстраполяции значений классов выборки на неклассифицированные пиксели. После анализа каждому пикселю присваивается значение класса исходной легенды.

Данные классификации полевых описаний (обучающая выборка) при совмещении с данными ДДЗ необходимы для определения статистических взаимосвязей между характеристиками пикселей космоснимков. С математической точки зрения они представляют собой обучающую выборку для установления зависимостей между номинальными значениями этой выборки и значениями пикселей снимков. Если использовать в качестве зависимой переменной единицы синтаксономического деления растительного покрова, присвоив им порядковые номера, то задача экстраполяции известных значений зависимой переменной на все множество значений независимых переменных (данных ДДЗ) решается методом пошагового дискриминантного анализа (ПДА) (Пузаченко, 2004). Этот вид многомерного анализа хорош также и тем, что позволяет сразу, на основе итоговой таблицы ПДА, оценить качество классификации значений зависимой переменной. Кроме того, метод пошагового анализа позволяет отбросить неинформативные независимые переменные, наличие которых проверяется на каждом шаге работы по наибольшему F-критерию, а вся процедура останавливается только тогда, когда все невключенные переменные отбрасываются (Халафян, 2010). Поэтому анализ идет по наиболее информативным переменным. Таким образом, мы имеем возможность построить по имеющимся данным модель земной поверхности и статистически проверить ее достоверность.

Для проведения анализа были подобраны безоблачные космические снимки Landsat 8 OLI: сцены за 31 января 2014 г., 21 апреля 2014 г. и 20 августа 2014 г. с разрешением 30 м

в каналах видимого и инфракрасного диапазона и 60 м в тепловых каналах (USGS. URL: http://earthexplorer.usgs.gov).

Для построения пространственной базы данных использовалось 7 каналов Landsat 8: b2, b3, b4, b5, b6, b11, b7. Первые три – каналы видимого спектра, b5, b6 и b7 – ближний и средний инфракрасный, b11 – тепловой. Кроме значений яркостей первых семи каналов, рассчитывались спектральные индексы (Moreno et al., 1999; Кренке, Пузаченко, 2008). Для каждого снимка Landsat были рассчитаны следующие индексы:

NDVI=(B4-B3)/(B4+B3) (нормализованный разностный индекс растительности) – чистая продукция, транспирация;

RVI=b4/b3 (относительный индекс растительности) – различные типы растительности с различной биомассой;

DVI=b4-b3 – разностный вегетационный индекс;

 $TSAVI = a \times (NIR - a \times R - b)/(a \times NIR + R + a \times b + x \times (1 + a^2))$, где y=ax+b, y – почвенная линия (линия вида y=x в пространстве b3/b4), а – точка пресечения и b – наклон почвенной линии, почвенная линия введена для уменьшения почвенного шума;

GreenNDVI=(b4-b2)/(b4+b3) (зеленый NDVI) – очень чувствителен к концентрациям хлорофилла;

TVI=[(b4-b3)/(b4+b3)+0,5]1/2×100 – интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, транспирация, типы растительности;

VI=(b7-b5)/(b7+b5) (индекс растительности) – различия биомассы и типы растительности;

NDB4B2=(b4-b2)/(b4+b2) – активность хлорофилла;

NDWI=(B5-B4)/(B5+B4) (нормализованный разностный водный индекс) – содержание воды в зеленой биомассе;

LMI =b5/b4 – содержание влаги в зеленой фитомассе;

NDB4B6=(b4-b6)/(b4+b6) – влажность поверхности;

NDSI=(b1-b4)/(b4+b1) (нормализованный разностный снежный индекс) – чувствителен к мощности снега, льда;

G/B =b2/b1 – отражают почвы и горные породы с высоким содержанием железа;

R/G =b3/b2 – различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли;

SWIR1_G=b5/b2 – различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли;

SWIR2/R =b7/b3 – дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты; SWIR1 =b7/b5 – глинистые отложения и горные породы, богатые глиной;

BR=0,33183×b1+0,33121×b2+0,55177×b3+0,42514×b4+0,48087×b5+0,25252×b7 – общая яркость, альбедо (яркость);

GR=-0,24717×b1-0,16263×b2-0,40639×b3+0,85468×b4+0,05493×b5-0,11749×b7 – интенсивность фотосинтеза, чистая продукция (зеленость);

WET=0,13929×b1+0,22490×b2+0,40359×b3+0,25178×b4-0,70133×b5-0,45732×b7 – содержание влаги в зеленой фитомассе (влажность).

Перед обработкой участки снимков, не относящиеся к лесной растительности, вошедшей в геоботаническую классификацию (водные объекты, населенные пункты, поля, свежие вырубки), были исключены путем маскирования.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) построена на основе горизонталей, оцифрованных с топографических карт масштаба 1 : 25 000. ЦМР создана с разрешением 5 м в 1 пикселе. На основе ЦМР были рассчитаны 7 характеристик рельефа: абсолютная высота, кривизна и экспозиция склонов, уклон поверхности, плановая кривизна, профильная кривизна, освещенность рельефа с юго-востока при высоте солнца 45°.

Таким образом, каждый пиксель анализируемых снимков характеризовался значениями отраженной радиации в первых семи каналах, их отношениями и разностями, а также значениями характеристик рельефа, которые использовались в качестве независимых переменных в ПДА, общее количество которых составило 88.

Обучающая выборка была создана на основе точек полевых описаний и таксационных данных. Каждая точка, соответствующая определенной группе ассоциаций, к которой было отнесено соответствующее ей описание растительности, обводилась полигоном большего или меньшего размера, в зависимости от представленности данной фитохоры на снимке. Для правильной идентификации на снимке места описания составлялись синтезированные изображения (*puc. 2*) по каналам 7:5:2 и 4:3:2, отражающие разные свойства растительности (Головина, Дубовик, 2011; Воробьева, 2012; Попов, 2013). Общее количество полигонов обучающей выборки составило 36. Общая их площадь составила 32 га. Каждый полигон получил номинальное цифровое значение в зависимости от принадлежности к определенной группе ассоциаций. Впоследствии по этой номинальной шкале (*maбл. 1*) составлялась легенда к геоботанической карте.



Рис. 2. Снимок Landsat 8 за 20 августа 2014 территории ключевого участка. А – синтез 4:3:2; Б – синтез 7:5:2

Полигональный слой обучающей выборки преобразовывался в растровый (в программе ERDAS) и объединялся с растровыми слоями ДДЗ в одну пространственную базу данных. При объединении слоев выполнялась унификация их пространственного разрешения до 5 м в 1 пикселе.

На следующем этапе проводился ПДА для выборки выделов, классифицированной на 10 классов. ПДА проводился по критерию лямбда Уилкса со значением статистик F-ввода и F-исключения 3,84 и 2,71, соответственно. Результаты дискриминантного анализа представлены в *maбл. 2*. Она отражает количество совпадений между исходной и предсказанной принадлежностью классифицируемых объектов к классам выборки. Помимо этого, в таблице содержится информация о том, какие объекты были переопределены из одного класса в другой. В *maбл. 2* показан процент пикселей исходного класса, отнесенного к предсказанному классу. Из диагонали *maбл. 2* видно, что все классы хорошо распознаются (качество распознавания 93,2–100%). Общее качество ПДА составило 97,2%, что достаточно высоко для пространственных данных Landsat (Гаврилюк, Ершов, 2012). Принципиальная схема последовательных этапов составления геоботанической карты ключевого участка показана на *puc. 3*. Составленная по изложенной методике геоботаническая карта представлена на *puc. 4*.



Рис. 3. Последовательность этапов составления геоботанической карты

	Исходный % пикселей									V	[exc	дно	ое ч											
Несгруппированные пиксели	Сосняки злаковые	Сосняки кисличные	Ельники широкотравные	Ельники кислично-зеленомошные	Ельники кисличные	Ельники влажнотравные	Осинники разнотравные	Березняки кислично-зеленомошные	Березняки кисличные	Березняки разнотравные	Несгруппированные пиксели	Сосняки злаковые	Сосняки кисличные	Ельники широкотравные	Ельники кислично-зеленомошные	Ельники кисличные	Ельники влажнотравные	Осинники разнотравные	Березняки кислично-зеленомошные	Березняки кисличные	Березняки разнотравные	Группы ассоциаций		
12,6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9	203584	0	0	0	9	0	0	0	0	0	1262	Березняки разнотравные		
$0,\!6$	0,0	0,0	0,0	0,5	8,0	0,0	1,8	2,3	98,8	0,0	9949	0	0	0	8	27	0	17	36	854	0	Березняки разнотравные		
12,7	0,0	0,0	0,0	1,2	0,6	0,0	0,5	93,2	0,0	0,0	206033	0	0	0	20	21	0	5	1462	0	0	Березняки разнотравные	Пред	
3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	94,9	0,5	0,0	0,0	56211	0	0	0	0	з	0	895	8	0	0	Березняки разнотравные	сказанн	
5,5	0,0	0,5	0,0	0,0	1,2	96,7	0,0	0,0	0,0	0,0	89872	0	17	0	0	42	704	0	0	0	0	Березняки разнотравные	ая прина	
55,7	0,0	0,3	0,0	0,3	96,4	1,1	2,8	2,1	1,0	0,1	902664	0	9	0	6	3449	8	26	33	9	1	Березняки разнотравные	адлежнос	
6,2	0,0	0,0	0,0	96,9	8,0	2,2	0,0	1,8	0,1	0,0	100095	0	0	0	1676	30	16	0	29	1	0	Березняки разнотравные	ть к груп	
0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	Березняки разнотравные	пе	
3,0	0,0	99,2	0,0	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49345	0	3213	0	10	4	0	0	0	0	0	Березняки разнотравные		
0,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2873	115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Березняки разнотравные		
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	1620693	115	3239	40	1729	3576	728	943	1568	864	1263	Итого		

97,2% сгруппированных пикселей классифицированы правильно

Таблица 2. Качество дискриминантного анализа



Рис. 4. Геоботаническая карта ключевого участка исследований растительности на юго-западе Московской области

Заметим, что при использовании традиционных методов классификации ДДЗ с применением алгоритмов контролируемой и неконтролируемой классификаций, входящих в набор инструментов ERDAS IMAGINE (Erdas..., 2005), для проверки качества полученных классифицированных изображений требуется сравнение с другими тематическими картами, имеющимися на данную территорию в распоряжении исследователя (Гаврилюк, Ершов, 2012; Елсаков, Поликарпова, 2015). Оценка же качества ПДА встроена в алгоритм его работы, поэтому результат классификации не нуждается в сравнении с другими картографическими источниками. Кроме того, ПДА имеет лишь одно ограничение на количество независимых переменных: оно должно быть на единицу меньше количества наблюдений (пикселей). Поэтому оказалось возможным включить в него не только яркостные характеристики пикселей, но и спектральные индексы, характеризующие продуктивность и обеспеченность влагой растительности, индексы, дающие количественную характеристику свойствам почв, а также и характеристики рельефа. Неинформативные переменные исключаются из анализа в ходе работы автоматически. В сочетании с простотой технического получения таблиц для ПДА и самого анализа это говорит о перспективности использования данного метода для создания карт земной поверхности.

Таким образом, метод дискриминантного анализа вполне оправдал себя при работе с совмещенными данными дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и данными полевых описаний. Это подтверждается не только статистическими характеристиками ПДА, но и визуальным анализом снимков.

Все операции с пространственными данными выполнены в геоинформационных пакетах ArcGIS, ERDAS IMAGINE, IBM SPSS, ENVI, Statictica.

Выводы

Составление геоботанической карты возможно путем совмещения данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа, полевых данных и дальнейшей их обработки методом дискриминантного анализа, предназначенного для классификации данных.

Метод дискриминантного анализа не только позволяет составить карту по полевым описаниям, но и проверить достоверность полученной классификации пикселей снимка. При этом для оценки качества классификации не требуется сравнение с другими тематическими картами (которых может не быть в распоряжении).

Благодарности

Автор приносит искреннюю благодарность за ценные консультации д.б.н. Ю.Г. Пузаченко, к.б.н. Р.Б. Сандлерскому, к.б.н. А.А. Кренке, а также Н.Г. Беляевой и Г.А. Виноградову за участие в полевых работах.

Литература

- 1. Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного университета, 1997. 296 с.
- 2. Беляева Н.Г., Попов С.Ю. Изменение лесистости западной части Наро-Фоминского района Московской области за последние 200 лет // Лесоведение. 2016. № 1. С. 44–54.
- 3. Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М. Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 30–42. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование Земли. СПБ.: СПбУ ИТМО, 2012. 168 с.
- Воробьева А.А. Дистанционное зондирование земли. Спол иппио, 2012. 100 с.
 Гаврилюк Е.А. Ершов Д.В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.
- Головина Л.А., Дубовик Д.С. Топографическое дешифрирование снимков. Новосибирск: СГГА, 2011. 60 с.
 Елсаков В.В., Поликарпова Н.В. Спутниковые методы в анализе изменений запаса лишайников в фитоце-
- нозах заповедника «Пасвик» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. T. 12. № 3. C. 87–97.
- 8. Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Известия РАН. Сер. Географическая. 2008. № 4. С. 112–124.
- 9. Кренке А.Н. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа. Дисс... канд.биол.наук. 25.00.23. М.: ИГ РАН, 2011. 128 c.

- 10. Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации // Экологическое планирование и управление. 2008. Т. 2. № 7. С. 10–25.
- 11. Лисовский А.А., Оболенская Е.В. Исследование ареалов мелких млекопитающих Юго-Восточного Забайкалья методом моделирования экологической ниши // Журн. общ. биологии. 2014. Т. 75. №5. С. 353–371.
- 12. Попов С.Ю. Геоинформационные системы и пространственный анализ данных в науках о лесе. СПб.: ИЦ Интермедия, 2013. 400 с.
- 13. Попов С.Ю., Беляева Н.Г., Басова Е.В., Тихонова Е.В., Кадетов Н.Г., Морозова О.В., Пузаченко М.Ю., Черненькова Т.В. База данных FORDIV // Св. о госрегистрации базы данных № 2014620979. М.: Роспатент. 08.07.2014.
- 14. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: ACADEMA, 2004. 416 с.
- 15. Сабуров Д.Н. Леса Пинеги. Л.: Наука, 1972. 173 с.
- Сандлерский Р.Б. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-лесной заповедник). Дисс. канд. биол. наук.: 03.02.08. М.: ИПЭЭ РАН, 2013. 269 с.
- 17. Смирнов В.Э., Ханина Л.Г. Методы анализа состояния растительного покрова // Восточноевропейские леса. История в голоцене и современность. М.: Наука, 2004. Т. 1. С. 290–313.
- 18. Халафян А.А. Математическая статистика с элементами теории вероятностей. М.: Бином, 2010. 491 с.
- 19. Imagine E. Практическое руководство Tour Guide. Norcross, Georgia: Leica Geosystems, 2005. 707 с.
- Moreno J.F., Maria-Carmen G., Luis A. Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs // Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods. Contract № ENV4-CT98-0740 Version 1.0, WP 3100 - EO Signal Analysis Methods. URL: http://dataserv.cetp.ipsl.fr/AIMWATER/ reports/EOsurvey_report.pdf, 1999.
- 21. USGS science for a changing world. URL: http://earthexplorer.usgs.gov.

Experience of creating a geobotanical map using discriminant analysis of field vegetation description and remote sensing data

S.Yu. Popov

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: s yu popov@rambler.ru

The paper focuses on the modern approach to creating a map of a study area (5466 ha, south-western Moscow Region) by combining remote sensing data, morphometric characteristics of the terrain and field data. The main classification technique used was combined spatial data stepwise discriminant analysis (SDA). The reliability of SDA was assessed by the criterion of lambda values. The quality of SDA was estimated at 97.2%, which is a very high value for Landsat images. The steps of the employed approach are specified and shown in a block diagram form. Applicability of the SDA method for accurate mapping of vegetation cover is shown; SDA-based classification does not require additional quality assessment by comparison with other thematic maps. Simplicity of both technical formation of the tables for SDA and the analysis itself imply good prospects for using the method for vegetation mapping.

Key words: geobotanical map, discriminant analysis, remote sensing data, digital terrain models, Landsat

Accepted: 26.11.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-25-35

References

- Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Kalinina V.R., Mamai I.I., Nizovtsev V.A., Khrustaleva M.A., Tsesel'chuk Yu.N., *Landshafty Moskovskoi oblasti i ikh sovremennoe sostoyanie* (Landscapes of the Moscow Region and its current state), Smolensk: Izd-vo Smolenskogo gumanitarnogo universiteta, 1997, 296 p.
- Belyaeva N.G., Popov S.Yu., Izmenenie lesistosti zapadnoi chasti Naro-Fominskogo raiona Moskovskoi oblasti za poslednie 200 let (Changes of forestry of Naro-Fominsk district Moscow region in the last 200 years), *Lesovedenie*, 2016, No. 1, pp. 44–54.
- Lesovedenie, 2016, No. 1, pp. 44–54.
 Vasilevich M.I., Elsakov V.V., Shchanov V.M., Primenenie sputnikovykh metodov issledovanii v monitoringe sostoyaniya lesnykh fitotsenozov v zone vybrosov promyshlennogo predpriyatiya (The use of satellite research methods in monitoring the state of forest communities in the area of industrial emissions), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11. No. 1, pp. 30–42.

- 4 Vorob'eva A.A., Distantsionnoe zondirovanie Zemli (Earth remote sensing), Saint Petersburg: SPbU ITMO, 2012, 168 p.
- Gavrilyuk E.A, Ershov D.V., Metodika sovmestnoi obrabotki raznosezonnykh izobrazhenii Landsat-TM 5. i sozdaniya na ikh osnove karty nazemnykh ekosistem Moskovskoi oblasti (Methods of joint analysis of the seasonal scenes of Landsat-TM and creation on their basis terrestrial ecosystems maps), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 15-23.
- Golovina L.A., Dubovik D.S., Topograficheskoe deshifrirovanie snimkov (Topographical interpretation of 6 images), Novosibirsk: SGGA, 2011, 60 p.
- Elsakov V.V., Polikarpova N.V., Sputnikovye metody v analize izmenenii zapasa lishainikov v fitotsenozakh zapovednika "Pasvik" (Satellite methods for the analysis of changes in lichen cover in vegetation communities 7. of Pasvik Nature Reserve), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015. Vol. 12, No. 3, pp. 87-97.
- 8 Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu., Fedyaeva M.V., Puzachenko Yu.G., Otobrazhenie prostranstvennogo var'irovaniya svoistv landshaftnogo pokrova na osnove distantsionnoi informatsii i tsifrovoi modeli rel'efa (Displaying spatial variation of properties of land cover based on remote sensing information and digital elevation model), Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya, 2008, No. 4, pp. 112–124.
- Krenke A.N., Otobrazhenie faktorov formirovaniya komponentov landshafta na osnove tematicheskikh kart, 9 distantsionnoi informatsii i trekhmernoi modeli rel'efa (Display form factor components of the landscape on the basis of thematic maps, remote sensing information and three-dimensional terrain model), Candidate's biol. sci. thesis, 25.00.23, Moscow: IG RAN, 2011, 128 p.
- 10. Krenke A.N., Puzachenko Yu.G., Postroenie karty landshaftnogo pokrova na osnove distantsionnoi informatsii (Mapping land cover based on remote sensing information), Ekologicheskoe planirovanie i upravlenie, 2008, Vol. 2, No. 7, pp. 10–25.
- 11. Lisovskii A.A., Obolenskaya E.V., Issledovanie arealov melkikh mlekopitayushchikh Yugo-Vostochnogo Zabaikal'ya metodom modelirovaniya ekologicheskoi nishi (Reaserching of the areals of small mammals of South-East Zabaikalie Region by the method of modeling ecological niche), Zhurn. obshch. Biologii, 2014, Vol. 75, No. 5, pp. 353–371. 12. Popov S.Yu., *Geoinformatsionnye sistemy i prostranstvennyi analiz dannykh v naukakh o lese* (Geographic
- Information Systems for use in forestry sciences), Saint Petersburg: ITs Intermediya, 2013, 400 p.
- 13. Popov S.Yu., Belyaeva N.G., Basova E.V., Tikhonova E.V., Kadetov N.G., Morozova O.V., Puzachenko M.Yu., Chernen'kova T.V. Baza dannykh FORDIV (Data Base FORDIV), Patent CR No 2014620979, Moscow: Rospatent, 08.07.2014.
- 14. Puzachenko Yu.G., Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh (Mathematical methods in ecological and geographical studies), Moscow: ACADEMA, 2004, 416 p
- Saburov D.N. Lesa Pinegi (Forest of the Pinega Region), Leningrad: Nauka, 1972, 173 p. 15.
- 16. Sandlerskii R.B., Termodinamicheskie kharakteristiki yuzhno-taezhnykh biogeotsenozov na osnove distantsionnoi informatsii (yug valdaiskoi vozvyshennosti, tsentral'no-lesnoi zapovednik) (Thermodynamic characteristics of southern taiga biocenoses based on remote sensing information (south of the Valdai Hills, Central Forest Reserve), Candidate's biol. sci. thesis: 03.02.08. Moscow: IPEE RAN, 2013, 269 p.
- 17. Smirnov V.E., Khanina L.G., Metody analiza sostoyaniya rastitel'nogo pokrova (Methods for analysis of vegetation), In: Vostochnoevropeiskie lesa. Istoriya v golotsene i sovremennost' (East European forests: history in the Holocene and current state), Moscow: Nauka, 2004, Vol. 1, pp. 290-313.
- 18. Khalafyan A.A., Matematicheskaya statistika s elementami teorii veroyatnostei (Mathematical Statistics with elements of the theory of probability), Moscow: Binom, 2010, 491 p.
- 19. Imagine E., Prakticheskoe rukovodstvo (Practical Guide), Norcross, Georgia: Leica Geosystems, 2005, 707 p.
- 20. Moreno J.F., Maria-Carmen G., Luis A., Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs, Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods. Contract No ENV4-CT98-0740 Version 1.0, WP 3100 - EO Signal Analysis Methods, available at: http://dataserv.cetp.ipsl.fr/ AIMWATER/reports/EOsurvey_report.pdf, 1999.
- 21. USGS science for a changing world, available at: http://earthexplorer.usgs.gov.