

## Картирование бореальных лесов на основе спутниковых данных (на примере особо охраняемых природных территорий Ленинградской области)

С.Г. Крицук

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности  
(НИЦЭБ РАН), Санкт-Петербург, Корпусная, 18  
E-mail: sit.bloom@gmail.com

Картирование лесов в бореальной зоне на основе спутниковых данных низкого разрешения связано с существенными трудностями. Коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) леса сильно зависят от архитектуры лесного покрова и высоты Солнца. Поэтому прямое их использование дает зачастую неудовлетворительные результаты. Предлагается использовать классификацию с обучением (методом максимального правдоподобия — ММП) для построения карт «растительных сообществ» (РС). Обучающая выборка, сформированная на основе наземных экспедиционных данных, должна содержать, по крайней мере, несколько десятков объектов. С данными наземных экспедиционных наблюдений должна быть связана иерархическая классификация, построенная на основе признаков, измеренных в точках наблюдения. Построение карты включает в себя построение карты классов ММП, число которых соответствует числу объектов в обучающей выборке, затем классы объединяются в соответствии с иерархической классификацией растительности (ИКР). Для объединения можно воспользоваться одним из уровней ИКР, например, в рамках классификации растительных сообществ на ассоциации — союзы — порядки — классы можно выбрать уровень порядка. Объединенные классы — биотопы — будут легко поименованы в соответствии с ИКР, составление легенды карты не составит труда. В рамках сотрудничества с Японским космическим агентством JAXA (PI ID 106) были составлены карты биотопов особо охраняемых природных территорий (ООПТ), расположенных на западе Ленинградской области — заказников «Кургальский» и «Березовые острова». Использование данных разносезонных съемок в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и также радарных съемок с различной поляризацией позволило выделить (с ошибками I и II рода менее 0,2) до 12 классов леса.

**Ключевые слова:** картирование лесов, спутниковые данные, ГИС, ALOS.

### Введение

Целью работы была оценка возможности таксации лесов и других «растительных комплексов» бореальной зоны по данным космической съемки. В качестве объекта исследований, по причине высокой степени изученности растительного покрова, выбрана территория ООПТ заказник «Кургальский». Работа была поддержана Японским космическим агентством JAXA (PI ID 106).

Заказник «Кургальский» расположен на западе Ленинградской области (рис. 1) на Кургальском полуострове Финского залива. Его граница с юга и востока проходит по реке Луге и протоке Россонь. На территории заказника представлены почти все типы лесной растительности, отмеченные для Ленинградской области. Приморские луга чередуются с песчаными отмелями, небольшими дюнами и каменистыми взморьями. Среди прочих выделяются сложные ельники со вторым ярусом широколиственных пород, небольшие участки лиственников и ильмовников — растительности более южного характера, редкой для Ленинградской области в целом. Вблизи побережий отмечены черноольховые топи с дубом — сообщества, широко распространенные в прошлом вдоль южной части Финского залива, но в других местах практически полностью уничтоженные человеком. В то же время сохранились богатые разнотравные луга. Особые варианты оステпененной луговой растительности сформировались на месте некоторых деревень. Примечательны болотные массивы (грядово-озерковый, грядово-мочажинный, низинные травяные и эутрофные черноольховые), два крупных олиготрофных озера (одно из которых — солоноводное).

В тридцатые годы двадцатого века на Кургальском полуострове произошла массовая вырубка хвойных лесов, но затем, с введением пограничного режима, хозяйственная деятельность была ограничена, что позволило лесам восстановиться до квазикоренных (Волкова и др., 2001).

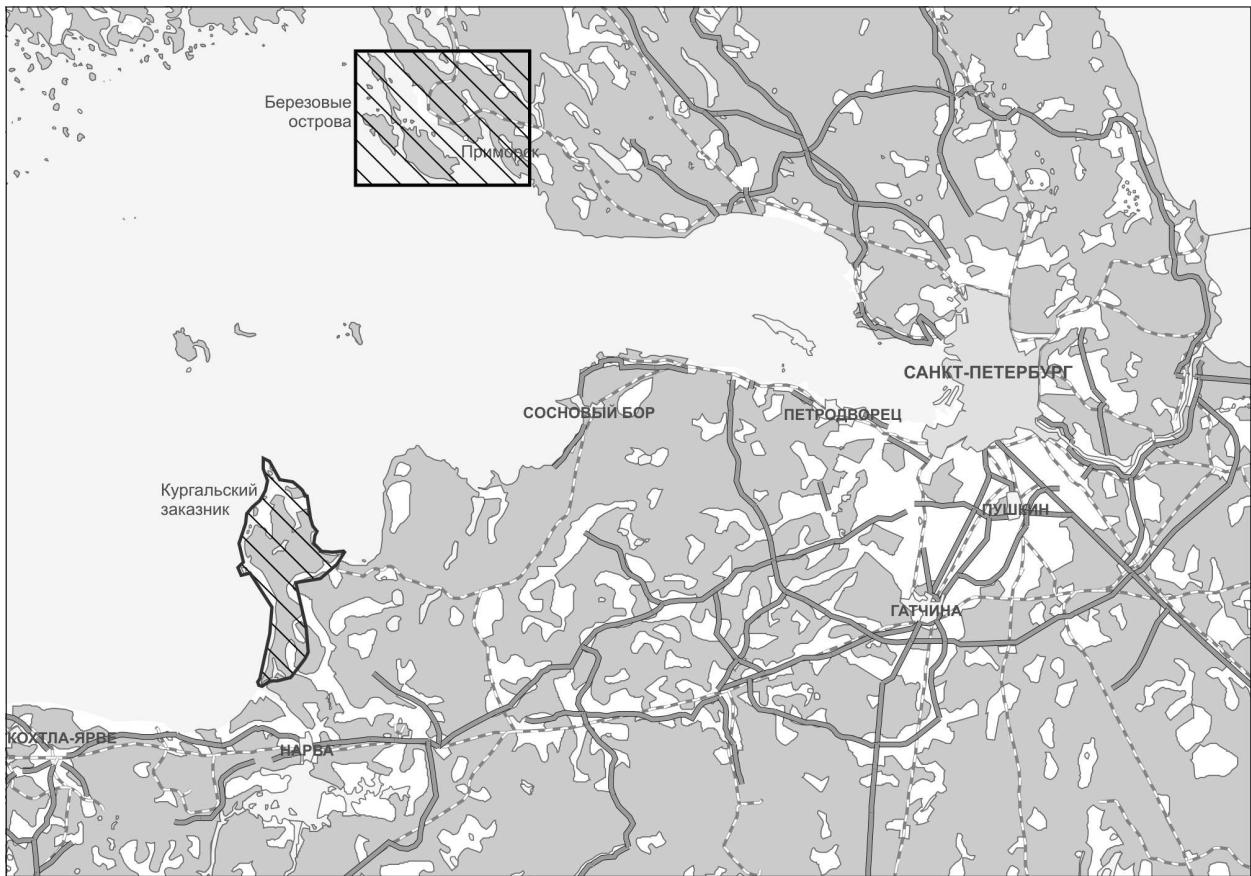


Рис. 1. Обзорная карта района работ (заштрихованы территории, для которых построены карты биотопов)

Проверка технологии картирования проводилась на примере заказника «Березовые острова». Он расположен на архипелаге Березовые острова в северо-восточной части Финского залива, в 40 км севернее полуострова Кургальский. Большая часть архипелага покрыта лесами таежной зоны. Хозяйственная деятельность на островах во второй половине XX века была ограничена: рубка лесов прекратилась, а большая часть сельскохозяйственных угодий зарастала лесами (Природная..., 2007).

## Материалы и методы

Для достижения поставленной цели необходимо было решение нескольких задач: формирование и анализ обучающей выборки, формирование информативного признакового пространства, определение технологии картирования, методов классификации и сегментации. Общая схема алгоритма представлена на рис. 2.

На первом этапе решалась задача формирования эталонной выборки. По данным наземных экспедиционных наблюдений, описаниям растительности на основе шкалы обилия Браун – Бланке (Westhoff, van der Maarel, 1978) были определены распространенные на территории заказника «Кургальский» растительные ассоциации, а также союзы, порядки и классы растительности — более общие элементы ИКР. Ключевые участки (около 170) были сформированы на основе данных наземных экспедиционных наблюдений, каждый из них включал не менее одной точки наблюдений. Каждый ключевой участок и соответствующая ассоциация растительности были интерпретированы в соответствии с ИКР.

Затем выполнялась классификация территории заказника методом максимального правдоподобия по полному (табл. 1) набору спутниковых данных при этом каждому ключево-

му участку соответствовал собственный класс, а после нее сегментация карты на основе объединения классов и в соответствии с положением растительных ассоциаций объектов обучающей выборки в ИКР. Для формирования легенды карты проводился анализ ошибок классификации (вероятностей «пропуска цели» и «ложной тревоги») в зависимости от уровня ИКР, на котором проводилось объединение. При объединении классов на уровне союзов максимальная вероятность ошибки достигала 0,7, а при объединении на уровне порядков — 0,25. Таким образом, как правило, объединение производилось на уровне порядка, однако классы, имеющие небольшую площадь распространения (менее 1 км<sup>2</sup>) или высокую (>0,25) вероятность ошибок классификации, были объединены на более высоком уровне иерархической классификации. Окончательная легенда включает 16 биотопов (табл. 3), четыре из которых связаны с результатами лесных пожаров и деятельностью человека.



*Рис. 2. Схема алгоритма построения карты*

На следующем этапе с точки зрения минимизации ошибок классификации оптимизировалось признаковое пространство. Для этого были выполнена классификация ММП по полному (см. табл. 1) и неполным наборам дистанционных данных с дальнейшим объединением классов в соответствии с разработанной на предыдущем этапе легендой. Вероятности «ложной тревоги» и «пропуска цели» (ошибки I и II рода) объединенных классов (рис. 4) позволяют определить оптимальный набор данных.

Таблица 1. Спутниковые данные, использованные для построения карты биотопов заказника «Кургальский»

Спутник	Инструмент	Разрешение, м (Мода)	Дата съемки
Terra	ASTER	15	29 июня 2001 г.
ALOS	AVNIR-2	10	10 июля 2007 г.
ALOS	AVNIR-2	10	10 мая 2007 г.
ALOS	AVNIR-2	10	25 марта 2007 г.
ALOS	AVNIR-2	10	26 июня 2008 г.
ALOS	AVNIR-2	10	10 июля 2010 г.
ALOS	AVNIR-2	10	1 июня 2009 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	2 августа 2007 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	16 июля 2007 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	18 июля 2008 г.

Таблица 2. Спутниковые данные, использованные для построения карты заповедника «Березовые острова»

Спутник	Инструмент	Разрешение, м (Мода)	Дата съемки
ALOS	AVNIR-2	10	10 июля 2007 г.
ALOS	AVNIR-2	10	25 марта 2007 г.
ALOS	AVNIR-2	10	15 мая 2009 г.
ALOS	AVNIR-2	10	17 июля 2009 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	5 сентября 2009 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	4 октября 2009 г.
ALOS	PALSAR	12,5 (FBD)	22 апреля 2009 г.

Таблица 3. Биотопы Государственного природного комплексного заказника (ГПКЗ) «Кургальский»

Название биотопов (в легенде карты)	Названия господствующих растительных ассоциаций	
	латинское	русское
«Широко-листственный лес»	<i>Ficario-Ulmetum</i>	Пойменные ильмовники
	<i>Aceri campestris-Tilietum cordatae</i>	Полидоминантные широколистственные леса с медвежьим луком <i>Allium ursinum</i>
	<i>Querco roboris-Tilietum cordatae</i>	Приморские дубравы
	<i>Carici elongatae-Alnetum medioeuropaeum</i>	Гигрофильные черноольшаники
«Мелко-листственный лес»	производные сообщества	Березовые, осиново-березовые леса, сероольшаники
«Еловый лес»	<i>Eu-Piceetum abietis</i>	Зеленомошные ельники в стадии демутации (березово-еловые леса); зеленомошные ельники
«Сложные ельники»	<i>Rhodobryo rosei – Piceetum abietis</i>	Сложные неморальнотравные ельники с бриевыми мхами <i>Bryales</i>
	<i>Querco-Piceetum abietis</i>	Сложные ельники с дубом
	<i>Melico nutantis-Piceetum abietis</i>	Неморальнотравные ельники в стадии демутации (осиново-еловые и черноольхово-еловые леса)
	<i>Melico nutantis-Piceetum abietis</i>	неморальнотравные ельники
«Сосновый лес»	<i>Cladonio arbusculae-Pinetum</i>	сухие лишайниковые сосняки
	<i>Oxycocco quadripetalii-Pinetum</i>	сфагновые сосняки
	<i>Vaccinium vitis-idaea-Pinetum boreale</i>	Зеленомошные сосняки
«Березово-сосновый лес»	<i>Oxycocco quadripetalii-Pinetum</i>	Болотные леса со сфагновыми мхами
«Сосновый лес на болоте»	ассоциации класса <i>Vaccinietea uliginosi</i> , занимающие промежуточное положение между классом бореальных лесов <i>Vaccinio-Piceetea</i> и классом болот <i>Oxycocco-Sphagnetea</i>	Низкоствольные болотные сосняки со сфагновыми мхами
«Болото»	ассоциации порядка <i>Scheuchzerietalia palustris</i>	Мелкоосоковые моховые мезотрофные болота
	ассоциации порядка <i>Sphagnetalia magellanici</i>	Олиготрофные и олиго-мезотрофные болота
	ассоциации порядка <i>Caricetalia fuscae</i>	Осоково-травяно-моховые болота
«Тростники»	ассоциации порядка <i>Phragmitetalia</i>	Сообщества крупных гигрофитов-гелофитов (тростника и т. д.)
	ассоциации порядка <i>Magnocaricetalia</i>	Крупноосоковые сообщества
«Луг»	ассоциации порядка <i>Molinietalia</i>	Влажные луга на минеральных почвах
	ассоциации порядка <i>Arrhenatheretalia</i>	Мезофитные луга на богатых почвах
	ассоциации порядка <i>Agropyretalia repentis</i>	Предшествующие лугам рудеральные сообщества многолетних трав
	ассоциации порядка <i>Artemisieta vulgaris Lohm. in Tx.</i>	Рудеральные сообщества высокорослых многолетников

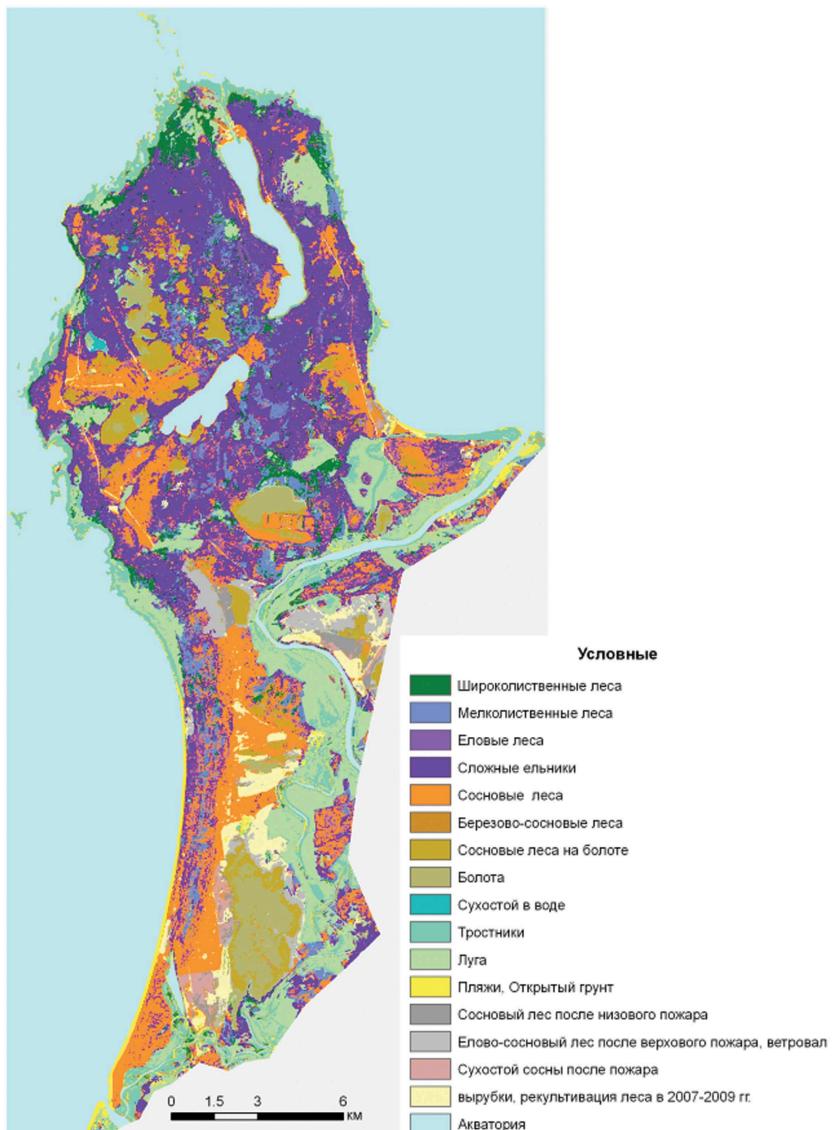


Рис. 3. Карта биотопов ГПКЗ «Кургальский», построенная на основе данных космической съемки

На завершающем этапе карта, составленная на основе оптимального набора данных, фильтруется для удаления выделов малого размера (см. рис. 2).

## Результаты

Карта биотопов ГПКЗ «Кургальский» (рис. 3) и соответствующая ей таблица ошибок (1 на рис. 4) показывают приемлемое качество распознавания. Масштаб полученной карты с учетом ее пространственного разрешения 10 м можно было бы определить как 1:50 000. Однако для карт такого масштаба обычно используется более сложная легенда.

Были рассмотрены различные варианты набора спутниковых данных (см. рис. 4) с точки зрения ошибок классификации, в частности возможность логарифмирования данных (сравнение 2 и 3 на рис. 4).

Проверка технологии картирования была проведена на примере заказника «Березовые острова». Для создания обучающей выборки была использована карта растительности архипелага масштаба 1:50 000 (Природная..., 2007). Набор использованных космических материалов (табл. 2) сходен (по сезонам съемки) и даже частично совпадает по датам с данными, использованными для построения карты заказника «Кургальский».

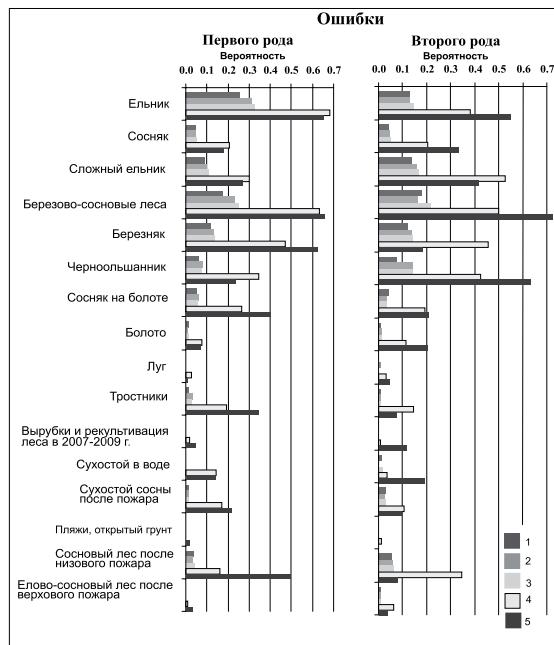


Рис. 4. Ошибки первого (вероятность «ложной тревоги») и второго (вероятность «пропуска цели») рода при построении карты биотопов заказника «Кургальский» методом максимального правдоподобия (для 170 классов) с последующим объединением классов в соответствии со схемой рис. 2: 1 — по полному набору данных (табл. 1); 2 — по полному набору (5 сцен) данных AVNIR (табл. 1) использованы логарифмы отсчетов; 3 — по полному набору (5 сцен) данных AVNIR (табл. 1); 4 — по одной (летней — 10 июля 2007 г.) сцене AVNIR использованы логарифмы отсчетов; 5 — ошибки первого и второго рода при построении карты биотопов методом максимального правдоподобия по полному набору данных (табл. 1) с предварительным объединением классов обучающей выборки в соответствии с табл. 3

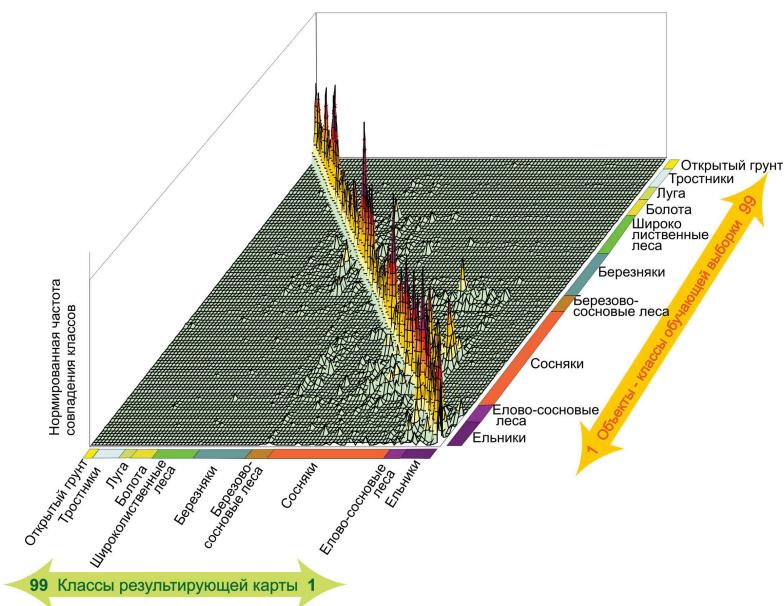


Рис. 5. Матрица соответствия классов обучающей выборки и результирующей карты. Строки и столбцы матрицы отсортированы в соответствии с классами лесов, аналогично рис. 4.

Детальная легенда карты растительности архипелага позволила оценить возможности распознавания по спутниковым данным классов на уровне растительных ассоциаций. Матрицу соответствия классов обучающей выборки и результирующей карты (рис.5) для этого проекта можно считать вполне представительной (по количеству пикселов в каждом классе). Поэтому ее анализ позволяет сделать ряд надежных выводов:

1. Большинство ассоциаций лесной растительности распознаются недостаточно хорошо (вероятности ошибок, как правило, находятся в диапазоне 0,3...0,6). Поэтому

при работе со спутниковыми данными необходимо использовать более крупные объединения растительных сообществ — союзы, порядки, классы.

2. Практически для всех классов диагональные члены матрицы максимальны.
3. Матрица имеет блочно-диагональный вид. Ненулевые недиагональные члены, как правило, появляются для классов из одного порядка ИКР. Например, классы сосновых лесов «перепутаны», главным образом, между собой. Ошибки их определения как классов других порядков, например, как ельников, минимальны.
4. Блочно-диагональный вид матрицы соответствия нарушают смешанные леса - березово-сосновые и елово-сосновые. Например, классы березово-сосновых лесов «перепутались» не только между собой, но и с классами сосняков, то есть с одной стороны березово-сосновые леса определены как сосняки, а с другой сосняки определены как березово-сосновые леса.

В целом для территории заказника «Березовые острова» удается выделить (при уровне ошибок  $>0,3$ ) 9 биотопов, формирование части которых связано с лесными пожарами и деятельностью человека.

## Обсуждение

В предлагаемой технологии есть очевидное преимущество — возможность в процессе картографирования изменять легенду карты, контролируя при этом качество распознавания. В принципе, этот процесс поддается автоматизации. Если задаться допустимыми пределами ошибок распознавания, то процесс сегментации карты и регуляризации легенды можно весьма эффективно оптимизировать, используя аппарат теории графов или даже простым перебором вариантов объединения. При этом не обязательно иметь хорошо проработанную ИКР — ее можно получить как результат такой оптимизации. Правда полученная таким образом иерархическая классификация будет нести отпечаток обучающей выборки с одной стороны и использованных данных космической съемки с другой, демонстрируя их реальные возможности распознавания.

С точки зрения возможностей данных космической съемки для распознавания boreальной лесной растительности очевидно (см. рис. 4), что ключевым моментом является использование разносезонных данных — весенних (оптимально конец апреля – начало мая) и летних (оптимально конец июля – начало августа). В этом случае ошибки классификации снижаются как минимум в два раза (сравнение 2 и 4 на рис. 4). Пополнение признакового пространства данными радарных съемок (эффективная площадь рассеяния — ЭПР в различных комбинациях поляризации передатчика и приемника) лишь незначительно снижает ошибки (сравнение 1 и 3 на рис. 4).

Важный элемент алгоритма картирования — сегментация карты — объединение классов на основе ИКР. Ошибки классификации увеличиваются в несколько раз, если классы обучающей выборки объединить и привести в соответствие с легендой результирующей карты до классификации ММП, а не выполнять сегментацию после нее (сравнение 1 и 5 на рис. 4).

Заметим также, что процедура картографирования никак не привязана к признаку, по которому классифицирована обучающая выборка. Если таких признаков несколько и для леса задан не только породный состав, но и другие таксационные характеристики, например, запасы древесины, бонитет, степень нарушенности, то можно попытаться построить карту какого-либо из них. Может, конечно, оказаться, что карте выбранного таксационного параметра с заданной достоверностью удается выделить лишь два или три класса. Возможность выделения большего числа классов определяется в значительной мере дисперсией обучающей выборки по выбранному параметру.

При выборе масштаба тематической карты (ТК), построенной по космическим данным, обнаруживается «противоречие». Если ориентироваться на пространственное разрешение спутниковых данных 10 м, то масштаб тематической карты может быть 1:50 000, что обе-

спечивает погрешностью проведения границ 0,2 мм. Минимальный (и модальный) размер площадных объектов на такой карте  $10 \times 10$  м. Объекты такого размера обычно показывают на картах и планах масштаба 1:10 000 и крупнее. Однако по содержанию легенды ТК биотопов соответствует лишь масштабу 1:200 000–1:500 000.

Временные и спектральные вариации коэффициентов спектральной яркости покрытых лесом территорий определяются вариациями четырех главных факторов, которые можно интерпретировать как: альbedo, перпендикулярный вегетационный индекс (ПВИ), архитектура полога леса (АПЛ — соотношение света и тени на пологе) и временные вариации альbedo, связанные с санитарными и сплошными рубками в период между съемками. Доли многомерной дисперсии, отвечающие за каждый из них, соотносятся как 7:3:3:1. Заметим, что среди главных нет фактора, отвечающего за состав покровной растительности, поэтому неудивительно, что классы сходного древостоя с покровной растительностью различных ассоциаций разделяются лишь с большими ошибками. Напротив, несколько классов сосновых лесов с различной сомкнутостью крон (соответственно с различными значениями ПВИ и АПЛ) распознаются лучше. В этом ключе интерес представляют результаты верификации карты архипелага Березовые острова, точнее ее «экстраполяции» на прилегающую территорию Карельского перешейка на основе карты растительности окрестностей порта Приморск (Волкова, Храмцов, 2003). Проблемы возникли при оценке ошибок распознавания еловых лесов. Они оказались весьма высокими. При ближайшем рассмотрении оказалось, что ельники на Березовых островах и на большей части континентальной суши, вошедшей в проект, сильно отличаются по спектральным характеристикам (КСЯ в оптическом диапазоне спектра), особенно по данным за 25 марта 2007 г. В это время еще лежал снег, поэтому разницу в КСЯ можно проинтерпретировать как различия в сомкнутости крон. Как и следовало ожидать, на снимках более высоко разрешения «континентальные» ельники в отличие от «островных» характеризуются регулярной текстурой, очевидно связанной с санитарными рубками различных лет. Учет хозяйственной деятельности, путем введения в обучающую выборку дополнительных ключевых участков «континентальных» ельников несколько улучшил результат (табл. 4). Однако из-за значительной разницы в датах наземной и космической съемки (2007–2009) и полевыми наземными наблюдениями (1997–2002) вероятности совпадения классов для ельников оказались невысокими. Сравнение карты, построенной на основе расширенной за счет «континентальных» ельников обучающей выборки, с материалами обработки актуальных авиационных съемок на отдельных участках дает более оптимистические результаты (см. табл. 4).

Таблица 4. Вероятность совпадение классов карты биотопов и результатов детального картирования растительности по различным данным

	<b>Цифровая авиационная съемка высокого разрешения в 2009–2011 гг.</b>	<b>Спектрональная авиационная съемка и полевые маршрутные наблюдения в 1997–2002 гг.</b>
Еловые леса	0,57	0,38
Сосновые леса	0,87	0,61
Мелколиственные леса	0,56	0,48

В целом результаты верификации карты по независимым данным можно признать удовлетворительными. Вероятности совпадения классов в табл. 4 и 5 могут оказаться ниже 0,8, в частности, за счет различной «фрактальности» выделяемых на картах объектов. По сравнению с традиционной (Волкова, Храмцов, 2003), использованной в качестве образца картой растительности, объекты на карте биотопов имеют модальную площадь в десятки раз меньше, а отношение площади к периметру, по крайней мере, в четыре раза меньше. Большая длина границ на сопоставляемых картах и их несовпадение из-за различной «изрезанности» могут существенно снижать вероятность совпадения классов.

## **Выводы**

1. Предложенная технология позволяет с известной вероятностью картографировать лесные территории бореальной зоны по данным космической съемки среднего разрешения (10...30 м). По тематической нагрузке масштаб карты растительности, полученной для уровня вероятности ошибок ниже 0,2, не крупнее 1:200 000, а по пространственному разрешению не мельче 1:50 000.
2. Почти все этапы процесса картографирования поддаются автоматизации, исключение составляет процесс формирования обучающей выборки. Для получения достоверной карты все объекты, которые необходимо картировать на исследуемой территории должны быть представлены в обучающей выборке.
3. Результаты верификации карты архипелага Березовые острова (с экстраполяцией на прилегающую континентальную территорию) по «независимым» данным можно признать удовлетворительными с учетом специфики построения векторных и растровых карт.

Работа была поддержана Японским космическим агентством JAXA (PI ID 106). Верификация карты по актуальным данным стала возможна благодаря материалам обработки авиационных съемок предоставленных Военно-космической академией имени А.Ф. Можайского.

## **Литература**

1. Волкова Е.А., Храмцов В.Н. Карта современной растительности // Природная среда побережья и акватории Финского залива (район порта Приморск). СПб., 2003. С. 34–37.
2. Волкова Е.А., Храмцов В.Н., Исаченко Г.А., Бубличенко Ю.Н., Бубличенко А.Г., Макарова М.А. Комплексное картографирование природной среды побережья Финского залива (район Лужской губы). СПб., 2001. С. 5–15.
3. Природная среда и биологическое разнообразие архипелага Березовые острова (Финский залив) / Под ред. Цвелея Н.Н. СПб., 2007. 366 с.
4. Westhoff V., van der Maarel T. The Braun-Blanquet approach Classification of plant communities. The Hague, 1978. P. 287–399.

# **Boreal forest mapping on the base of satellite data (nature reserve of Leningrad region)**

**S.G. Krutsuk**

*Scientific Research Centre of Ecology Safety Russian of Academy of Science  
Saint-Petersburg, Korpusnaya, 18  
E-mail:sit.bloom@gmail.com*

Boreal forest mapping by using medium resolution satellite data is associated with the significant difficulties. Satellite measured reflectances of the forest canopy are highly dependent on the forest canopy architecture and sun elevation. As result simple methods of the forest mapping by using these features often leads to unsatisfactory results. It is proposed to use the supervise classification (maximum likelihood classification — MLC) to compile map of vegetation communities (VC map). Training set has been formed on the basis of field expeditionary data and must contain at least a few dozen objects. Field observation data should be linked with hierarchical vegetation classification (HVC), based on the key areas forest's characteristics. Mapping process includes the satellite data MLC, class number of which corresponds to the number of training set objects. Then the classes are combined in accordance with the hierarchical vegetation classification. One of the HVC levels can be used as a rule of classes combine. For example, in the classification of plant communities on the association – unions – orders – classes you can choose the level of order. Combined classes — biotopes will be easily named in accordance with HVC. Biotopes maps of protected areas located in the west of the Leningrad Region — Kurgalsky and Berezovye Islands Reserves were made up under the support of the Japanese Space Agency JAXA (PI ID 106). There are possible to distinguish up to 12 forest biotopes (with I and II-errors less than 0.2) on these areas using different season satellite data in the visible and near infrared bands and L-band radar data with different polarization modes.

**Keywords:** forest mapping, satellite data, GIS, ALOS.