

## Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области

М.Ю. Пузаченко<sup>1</sup>, Т.В. Черненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия*

*E-mail: puzak@bk.ru*

<sup>2</sup>*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

*E-mail: chernenkova50@mail.ru*

Работа посвящена выявлению закономерностей формирования типологического разнообразия растительного покрова на основе использования цифровой модели рельефа (ЦМР), наземных исследований и данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Исследуемая территория располагается в центральной части Мурманской области и характеризует большую часть Лапландского заповедника, территории горного массива Хибин, а также окрестности металлургического комбината. Результаты пошагового дискриминантного анализа продемонстрировали возможность выявления относительно большого числа естественных и антропогенно нарушенных типов растительных сообществ на уровне групп ассоциаций. Создана карта актуальной растительности исследуемого региона (масштаб 1: 200 000). Анализ полученной карты показал, что около 23% исследуемой территории представлено производными сообществами антропогенного происхождения различной степени трансформации. Примененный для классификации эколого-фитоценотический подход позволил отразить в легенде карты информацию о коренных и производных сообществах, имеющих разные экотипические условия. Использование различных источников пространственных данных, наряду с применением методов статистического анализа, дало возможность не только разработать карту растительного покрова, но и выделить основные факторы его дифференциации на региональном уровне, в числе которых основными являются климатические высотные градиенты, антропогенные нарушения, водный режим и естественное саморазвитие растительных сообществ.

**Ключевые слова:** лесной покров, ценоценотическое разнообразие, факторы варьирования, картографирование, классификация, дистанционная информация, цифровая модель рельефа, Мурманская область

*Одобрена к печати: 18.07.2016*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191*

Причины пространственной вариабельности растительного покрова выступают предметом давних дискуссий в силу существующей неопределенности факторов, определяющих на разных уровнях организации его разнообразие. В отечественной и международной практике нет противоречий при выделении эколого-географических единиц по «стабильным» природным характеристикам (климату, геологии, гидрологии, растительности и почвам), в то время как значимость антропогенного фактора в экологическом зонировании продолжает дискутироваться. Ландшафтоопределяющая роль хозяйственной деятельности человека дает основание рассматривать два направления выделения территориальных единиц по «стабильным» природным характеристикам (Bailey, 2005) и как результат взаимодействия природных и социально-экономических связей (Тишков, 2012; Múcher et al., 2010; Pinto-Correia et al., 2003; van Eetvelde, Antrop, 2007). При этом считается, что нижние уровни пространственной шкалы в большинстве регионов Европы подчинены антропогенному фактору почти полностью. Таким образом, анализ пространственной неоднородности растительного покрова, включая изучение локально-региональных особенностей антропогенных модификаций природных экосистем, является важной и актуальной задачей. Значимость этой задачи еще более усиливается в отношении экосистем пограничных местообитаний, особенно уязвимых к внешним воздействиям.

Изучение пространственно-временной структуры растительного покрова невозможно без использования картографических материалов, отражающих его актуальное состояние. В мировой практике широко используется информация дистанционных изображений о структуре и свойствах растительности, в том числе в целях разномасштабного картографирования растительного покрова (Барталев, Лупян, 2013; Пузаченко и др., 2014; McRoberts, 2006; Fatoyinbo et al., 2008; Tomppo et al., 2008; Lawley et al., 2015). Показано, что дистанционная информация фиксирует характер преобразования солнечной энергии наземным покровом и тем самым имеет прямое функциональное значение для его свойств (Сандлерский, Пузаченко, 2009; Kay, Fraser, 2001; Chemin, 2003; Jorgensen, 2004). Опыт работ в этом направлении с привлечением дополнительных характеристик природной среды делает возможным более широкое использование данных дистанционного зондирования (ДЗ) при оценке современного состояния лесного покрова и параметров биоразнообразия, а также при выявлении закономерностей его пространственно-временной организации в условиях антропогенного воздействия. Характеристики рельефа рассматриваются как матрица, определяющая перераспределение влаги, веществ и солнечной энергии (Сысуев, 2003, 2004; Симонов, 1998; Ласточкин, 1991; Шарая, Шарый, 2003) на различных иерархических уровнях его организации (Пузаченко и др., 1999; Пузаченко, 2004; Turcotte, 1997).

Современное развитие методов статистического анализа, технических средств измерения и обработки данных позволяют проводить оценку состояния растительного покрова на основе количественного подхода, что значительно повышает объективность, оперативность и качество анализа. В представленной работе реализован один из вариантов данного подхода с количественной оценкой и анализом природной и антропогенной полифакторности растительного покрова на северном пределе распространения бореальных лесов Кольского полуострова. Анализ пространственной неоднородности растительного покрова сопровождается созданием карты растительности центральной части Кольского полуострова (бассейн оз. Имандра).

### **Объект исследований**

Район исследований (67° 50' с.ш., 32° 35' в.д.) расположен в центральной части Мурманской области (Кольский полуостров) и входит в подзону северной тайги умеренного пояса Атлантико-арктической западной области. Общая площадь модельной территории – около 8400 км<sup>2</sup> (рис. 1). Для территории характерен сложный пересеченный рельеф с перепадом высот от 100 м до 1200 м над ур. моря. Равнинную область, а также нижнюю и среднюю часть склонов (200–350 м над ур. м.) занимают еловые леса (*Picea obovata*<sup>1</sup>) с сосной (*Pinus sylvestris*) и березой (*Betula pubescens*). Помимо ельников, на равнине

---

<sup>1</sup> Названия сосудистых растений в соответствии с: Черепанов, 1995; мохообразных: Игнатов, Афонина, 1992; Константинова и др., 1992; лишайников: Santesson et al., 1993

и в межгорных долинах (180–250 м над ур. м.) распространены сосняки с примесью березы. Депрессии, озерные котловины и речные долины заняты болотами. Выше по склону (350–450 м над ур. м.) экотон между лесными и тундровыми сообществами представлен березовыми криволесьями, иногда с примесью ели. В верхней части склонов и на вершинах холмов (400–800 м над ур. м.) пояс березовых криволесий сменяется тундрами, сначала – полидоминантными кустарничковыми, затем – мелкотравными и кустисто-лишайниковыми. Еще выше располагаются группировки эпилитных лишайников с небольшим участием петрофитных мхов и единичными высшими растениями, иногда чередующимися с фрагментами тундровых сообществ. Эпилитно-лишайниковая растительность занимает каменные осыпи и скалы. В отдельных горных массивах, на высоте около и более 1000 м над ур. м., присутствуют долинные и каровые многолетние снежники.

Помимо высотных градиентов горных территорий и естественной динамики дифференциацию растительного покрова изучаемой территории определяют разные виды антропогенных нарушений. Основными являются пожары и атмосферное загрязнение выбросами горно-металлургического комбината «Североникель» (ГМК), состоящими из мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей смесь сульфидов и оксидов тяжелых металлов (в основном Ni и Cu) и оксида серы SO<sub>2</sub>.

### Методы исследований

Для оценки современного состояния и выделения факторов дифференциации растительного покрова использован подход, интегрирующий наземную и дистанционную информацию. В рамках данного подхода характеристики биосистем, измеренные при наземных исследованиях, сопоставляются с мультиспектральной дистанционной информацией и параметрами рельефа («внешние» переменные). В основе количественной реализации такого подхода лежит пошаговый дискриминантный анализ (Электронный учебник..., 2001; Пузаченко, 2004, 2009). Суть метода заключается в подборе взаимно независимых линейных комбинаций «внешних» переменных (данных дистанционного зондирования и параметров рельефа), в наибольшей степени разделяющих классы оцениваемых в ходе наземных исследований характеристик биосистем. Наличие статистически значимых взаимосвязей между ними и комбинациями «внешних» переменных (осями дискриминантного анализа) позволяет провести интерполяцию классов исследуемых характеристик для всей модельной территории. Относительное качество дискриминации определяется как доля верно определенных моделью классов от исходно заданных.

Расчет дискриминантных осей проводится последовательно, при этом первая ось имеет максимальный вклад при разделении классов, вторая – меньший и т.д. Таким образом, оси дискриминантного анализа являются непрерывным и ортогональным отображением варьирования дискретных классов. Число дискриминантных осей ограничивается числом классов минус единица и/или числом «внешних» переменных. Статистическая оценка

достоверности (лямбда-критерий) позволяет исключить из дальнейшего анализа статистически недостоверные дискриминантные оси. Полученное множество дискриминантных осей является основой для многомерного исследования пространственных взаимосвязей и анализа пространственной дифференциации растительного покрова, его компонентов или отдельных характеристик, а также выделения факторов наблюдаемой дифференциации (Хакен, 1980, 2005).

В наиболее простом варианте рассматриваются не отдельные характеристики растительного покрова, а их совокупности, обозначаемые через типы растительных сообществ. В этом случае оси дискриминантного анализа задают непрерывное отображение дифференциации территории относительно заданных типов растительных сообществ через характеристики рельефа и ДДЗ. Связь дискриминантных осей с характеристиками ДДЗ, цифровой моделью рельефа (ЦМР), полевыми описаниями и другими источниками информации позволяет интерпретировать отображаемое ими пространственное варьирование с точки зрения процессов и факторов, определяющих наблюдаемую пространственную дифференциацию. В результате изменение вклада и/или исключение дискриминантных осей может позволить моделировать пространственную дифференциацию анализируемых типов в зависимости от прогнозируемых изменений соответствующих им процессов и факторов.

### **Материалы исследований**

В качестве источников пространственной информации о состоянии характеристик растительности использованы данные геоботанических описаний, мультиспектральные данные дистанционного зондирования и топографические карты масштаба (1:50000) и данные лесной таксации на уровне лесничеств. Полевые геоботанические описания (n=608) выполнены по стандартной методике на пробных площадях (20×20 м) с использованием GPS-позиционирования. Выбор положения точек описаний проведен на основе предварительного визуального и количественного (автоматическая классификация) анализа ДДЗ, ЦМР и лесотаксационных данных таким образом, чтобы описываемые типы растительных сообществ и их местоположение охарактеризовали основные эколого-фитоценотические условия региона. Особое внимание при наземных исследованиях уделялось антропогенно модифицированным сообществам в районе горно-металлургического комбината «Североникель» (ГМК).

Классификация сообществ осуществлялась на основе сходства как структуры растительного сообщества, так и видового состава всех ярусов при выделении характерного ядра сопряженных видов и их обилия. Группы ассоциаций объединяли фитоценозы сходных условий местообитаний и фитоценозы со сходным составом и обилием коллективных доминантов нижних ярусов, включающих виды определенных эколого-ценотических групп. Типизация растительного покрова была проведена с учетом имеющихся в литературе классификационных схем растительного покрова (Нешатаев, Нешатаева, 2002;

Королева, 2009), а также оригинальных разработок авторов для производных типов сообществ (Черненко и др., 2009, 2011; Chernenkova et al., 2015).

Для полного охвата разнообразия наземного покрова территории на основе всей имеющейся пространственной информации дополнительно выделены типы наземного покрова и водных объектов, не представленные в полевых описаниях (например, нивально-гольцовый, карьеры и отвалы, водный с тремя градациями мутности воды и проч.) (табл. 1). Это позволило охарактеризовать пространственное разнообразие растительности и наземного покрова региона в целом 780 точками.

Для расчета высот и характеристик рельефа по данным топографических карт масштаба 1:50000 построен регулярный грид (матрица) высот или ЦМР. Построение ЦМР проведено на основе векторизованных изогипс и высотных отметок рельефа, а также водоемов с отметками высот урезов воды методом нелинейной интерполяции (программное приложение ErdasImagine). Размер ячейки (пикселя) равен 60 м, что соответствует разрешению топокарт, масштабу исследований и соизмеримо с размерами пробной площади. Линейные размеры наиболее представленных структур рельефа территории определялись на основе анализа его спектра (Turcotte, 1997; Пузаченко, 1997). Всего в рамках масштаба исследований выделено восемь иерархических уровней организации рельефа от 0,180 км до 9 км. Полученные значения определяют размеры скользящего окна при расчете характеристик рельефа (относительная высота, уклон, минимальная и максимальная кривизна, освещенность с востока и юга при высоте солнца  $45^\circ$ , профильная, плановая, долготная и кросс-секционная выпуклости).

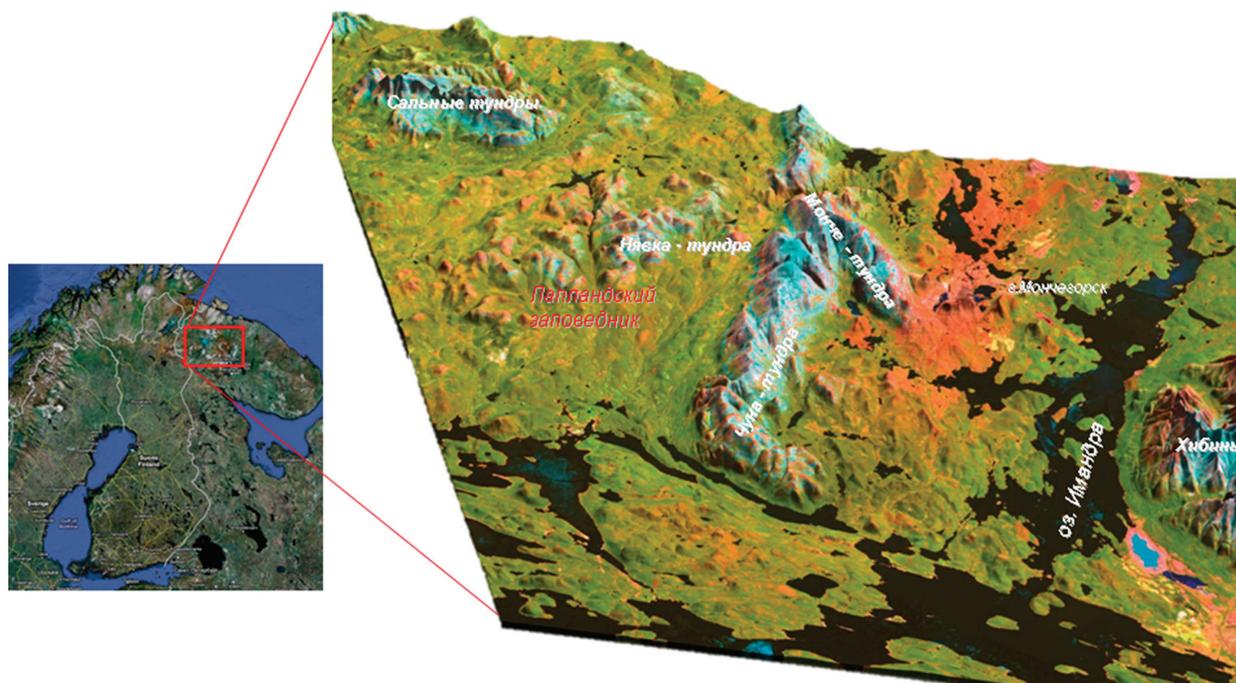


Рис. 1. Район исследования

Таблица 1. Результаты дискриминантного анализа типизации наземного покрова центральной части Мурманской области

Класс легенды		Относительное качество дискриминантного анализа, %	Точки обучающей выборки, ед.	Прогноз площади, %
Горные тундры				
1. Снежники <sup>2</sup>		100	11	0,01
2. Голы (выходы коренных пород, россыпи щебнистого, каменистого, крупноглыбистого элювия с фрагментами растительного покрова не более 10%)				
2.1. Россыпи крупноглыбистого элювия и выходы кристаллического фундамента с фрагментами растительного покрова с преобладанием корковых лишайников ( <i>Rhizocarpon geographicum</i> , <i>Umbilicaria</i> spp., <i>Arctoparmelia centrifuga</i> )		87,0	108	1,35
2.2. Россыпи щебнистого и (или) каменистого элювия и выходы кристаллического фундамента с куртинами кустарничков ( <i>Silene acaulis</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> ), граминоидов ( <i>Juncus trifidus</i> , <i>Festuca ovina</i> , <i>Carex bigelowii</i> ), лишайников ( <i>Flavocetraria nivalis</i> , <i>Alectoria ochroleuca</i> , <i>Cetraria islandica</i> )		100	1	0,08
3. Разреженная тундровая растительность (менее 30%) пологих склонов, плаги, плоских вершин, гребней				
3.1. Несомкнутые лишайниковые ( <i>Flavocetraria nivalis</i> , <i>Alectoria ochroleuca</i> , <i>Cetraria islandica</i> ), мохово ( <i>Racomitrium lanuginosum</i> )-лишайниковые и кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Saxifraga oppositifolia</i> , <i>Dryas octopetala</i> , <i>Loiseleuria procumbens</i> , <i>Diapensia lapponica</i> )-лишайниковые группировки на щебнистом и каменистом элювии		75,0	8	0,86
4. Сомкнутая (более 30%) тундровая растительность на вершинах и склонах гор на хорошо и умеренно дренированных почвах				
4.1. Лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>Flavocetraria nivalis</i> ) группировки		47,4	19	2,18
4.2. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Arctous alpina</i> , <i>Betula nana</i> , <i>Carex bigelowii</i> )-лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>Flavocetraria nivalis</i> , <i>Cetraria islandica</i> ) тундры		31,8	22	2,54
4.3. Кустарничковые ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Betula nana</i> ) мохово ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Ptilidium ciliare</i> , <i>Barbilophozia</i> spp., <i>Pohlia nutans</i> )-лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>Cladonia arbuscula</i> , <i>Cetraria islandica</i> , <i>Orthocaulis</i> spp.) тундры		38,1	21	3,23

<sup>2</sup> курсивом выделены классы, полученные на основе данных топографических карт и ДДЗ; курсивом выделены классы, полученные на основе данных топографических карт и ДДЗ;

<sup>3</sup> \* и \*\* обозначены производные типы на дигрессионных и демулационных стадиях сукцессий

4.4. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Betula nana</i> )-моховые ( <i>Racomitrium</i> spp., <i>Pleurozium schreberi</i> ) тундры	77,8	9	0,79
4.5* Кустарничковые ( <i>Betula nana</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>V. vitis-idaea</i> ) и разнотравно-злаковые ( <i>Avenella flexuosa</i> , <i>Deschampsia caespitosa</i> , <i>Chamaenerion angustifolium</i> ) группировки	0	4	2,78
4.6* Осоково-ситниковые лишайниковые ( <i>Carex bigelowii</i> , <i>Juncus trifidus</i> , <i>Umbilicaria</i> spp., <i>Stereoscaulon alpinum</i> ) группировки	77,8	9	0,69
4.7. Кустарничковые ( <i>Betula nana</i> , <i>Salix laricina</i> , <i>S. glauca</i> ) кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> )-моховые ( <i>Hylacomium splendens</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> ) сообщества на границе с поясом березовых криволесий, в долинах ручьев и рек	66,7	9	0,50
5. Сообщества из травянистых мезофитов и психрофитов в ложбинах и депрессиях в горно-тундровом поясе			
5.1. Мелкотравно-злаковые ( <i>Anthoxanthum alpinum</i> , <i>Avenella flexuosa</i> , <i>Nardus stricta</i> ) луговины	50	6	0,46
6. Луговая растительность в долинах ручьев и на влажных пологих склонах			
6.1. Кустарничково ( <i>Salix reticulata</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Betula nana</i> )-мелкогравные ( <i>Saxifraga stellaris</i> , <i>Oxuria digyna</i> ) приручьевые сообщества и группировки	66,7	6	0,35
<b>Березовые криволесья</b>			
7. Березовые криволесья ( <i>Betula pubescens</i> ssp. <i>szerepanovii</i> ) и редколесья с отдельными елями ( <i>Picea obovata</i> ) и соснами ( <i>Pinus sylvestris</i> )			
7.1. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> , <i>Betula nana</i> , <i>Calluna vulgaris</i> )-лишайниковые ( <i>Flavocetraria nivalis</i> , <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>Cetraria islandica</i> ) и кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>Betula nana</i> ) зеленомошно ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> )-лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>Cetraria islandica</i> , <i>Flavocetraria nivalis</i> ) березовые криволесья	46,2	13	1,76
7.2* Кустарничковые ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> ) березовые криволесья и редколесья на россыпи щебнистого и (или) каменистого элювия и выходах кристаллического фундамента	50,0	6	1,16
7.3* Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Arctous alpina</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Carex bigelowii</i> , <i>Juncus trifidus</i> , <i>Avenella flexuosa</i> )-корково-лишайниковые ( <i>Trapeleopsis granulosa</i> , <i>Cladonia deformis</i> ) березовые криволесья и редколесья	57,1	7	0,77
7.4* Несомкнутые кустарничковые и моховые сообщества ( <i>Pohlia nutans</i> ) на россыпи щебнистого и (или) каменистого элювия и выходах кристаллического фундамента	63,6	11	0,37
7.5. Кустарничково ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )-травяные ( <i>Chamaenerion humifusum</i> , <i>Chamaenerion angustifolium</i> , <i>Geranium sylvaticum</i> ) березовые криволесья	60	5	0,19

<b>Северо-таежные темнохвойные леса</b>				
8. Еловые леса ( <i>Picea obovata</i> ) с участием сосны ( <i>Pinus sylvestris</i> ) и березы ( <i>Betula pubescens</i> )				
8.1. Кустарничково-зеленомошно-лишайниковые ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> , <i>Cetraria islandica</i> , <i>Cladonia</i> spp.) еловые леса с сосной и березой	100	5	7,13	
8.2. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> )-зеленомошные ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> ) леса с участием сосны и березы	32,1	28	5,56	
8.3* Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> )-печеночниковые ( <i>Barbilophozia</i> spp., <i>Lophosia</i> spp., <i>Orthocaulis</i> spp.) еловые леса с березой, местами с лишайниками ( <i>Cetraria islandica</i> , <i>Cladonia</i> spp.)	60,0	35	1,81	
8.4* Кустарничковые ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>V. myrtillus</i> ) и травяно ( <i>Avenella flexuosa</i> )-кустарничковые еловые леса с березой	39,1	23	0,96	
8.5* Кустарничково-корково-лишайниковые ( <i>Trapeliopsis granulosa</i> , <i>Cladonia deformis</i> ) еловые леса с березой	85,7	7	0,30	
8.6. Высокогравные и разнотравные ( <i>Cicerbita alpina</i> , <i>Geranium sylvaticum</i> ) еловые леса с березой	83,3	6	0,93	
8.7. Кустарничково ( <i>Rubus chamaemorus</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> )-сфагновые ( <i>Sphagnum girgensohnii</i> ) еловые леса с березой	63,6	11	1,69	
8.8. Травяно-сфагновые ( <i>Carex nigra</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Equisetum palustre</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Sphagnum girgensohnii</i> , <i>S. russowii</i> , <i>S. angustifolium</i> ) еловые леса	60,0	5	0,55	
<b>Северо-таежные светлохвойные леса</b>				
9. Сосновые леса ( <i>Pinus sylvestris</i> ) с участием березы ( <i>Betula pubescens</i> )				
9.1. Лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>C. rangiferina</i> ) редкостойные сосновые леса на выходах скальных пород	100	4	1,47	
9.2. Кустарничково-лишайниковые ( <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Arctous alpina</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>C. rangiferina</i> ) редкостойные сосновые и сосново-березовые леса	45,5	11	1,49	
9.3* Кустарничково-корково-лишайниковые ( <i>Trapeliopsis granulosa</i> ) сосновые леса с березой	50,0	14	1,35	
9.4. Кустарничково-зеленомошно-лишайниковые ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Cetraria islandica</i> , <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>C. rangiferina</i> ) сосновые леса с березой	38,5	13	1,99	

9.5. Кустарничково ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Betula nana</i> )-зеленомошные ( <i>Dicranum majus</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Polytrichum juniperinum</i> ) сосновые леса с березой	56,7	30	9,45
9.6* Кустарничковые ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Avenella flexuosa</i> ), иногда с печеночными мхами ( <i>Barbilophozia</i> spp., <i>Orthocaulis</i> spp.) сосновые леса с березой	29,4	17	2,65
9.7* Кустарничковые ( <i>Ledum palustre</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Calluna vulgaris</i> ) с фрагментарным моховым покровом ( <i>Pohlia nutans</i> ) сосновые леса	0	6	0,99
9.8* Кустарничково ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Calluna vulgaris</i> )-долгомошные ( <i>Polytrichum</i> spp.) сосновые леса с березой	42,9	7	3,33
9.9. Кустарничковые ( <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Ledum palustre</i> ) и травяно-кустарничковые сфагновые редкостойные сосновые леса с участием березы	41,7	12	3,13
9.10. Травяно ( <i>Carex</i> spp., <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Molinia coerulea</i> , <i>Vaeothyon cespitosum</i> )-сфагновые сосняки	50,0	8	5,15
<b>Северо-таежные мелколиственные леса</b>			
10. Березовые леса ( <i>Betula pubescens</i> ) с елью ( <i>Picea obovata</i> ) и сосной ( <i>Pinus sylvestris</i> )			
10.1. Кустарничково ( <i>Ledum palustre</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> )-лишайниковые ( <i>Cladonia stellaris</i> , <i>C. arbuscula</i> , <i>C. rangiferina</i> , <i>C. senotea</i> , <i>C. deformis</i> ) разреженные и порослевые леса	40,0	5	2,08
10.2. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> )-зеленомошные ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> ) березовые леса с участием сосны и ели	55,6	9	0,99
10.3. Кустарничково ( <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> )-травяно ( <i>Chamaepericlymenum suecicum</i> , <i>Avenella flexuosa</i> )-зеленомошные ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> ) березовые леса	33,3	6	0,20
10.4* Кустарничковые ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Avenella flexuosa</i> ) и травяно-кустарничковые ( <i>Chamaepericlymenum suecicum</i> ) березовые разреженные и порослевые леса	34,6	26	2,27
10.5* Кустарничково-корково-лишайниковые ( <i>Trapeleopsis granulosa</i> ) березовые порослевые леса с ивой	80,0	5	0,09
10.6** Разреженные кустарничково-моховые ( <i>Pohlia nutans</i> ) березовые порослевые леса	45,0	20	1,18
10.7. Разнотравно-кустарничковые ( <i>Chamaenerion angustifolium</i> , <i>Geranium sylvaticum</i> , <i>Equisetum palustre</i> ) и влажногравные березовые леса с елью	62,5	8	0,58

10.8. Кустарничково ( <i>Betula nana</i> , <i>Rubus chamaemorus</i> , <i>Ledum palustre</i> )-травяно ( <i>Equisetum palustre</i> )-сфагновые ( <i>Sphagnum girgensohnii</i> ) березовые леса с елью	25,0	4	0,53
11. Осинные леса ( <i>Populus tremula</i> )			
11.1. Кустарничковые и травяно-кустарничковые осинные леса	66,7	3	1,81
<b>Болота</b>			
12.1. Травяно ( <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Carex rotundata</i> , <i>C. rariflora</i> )-сфагновые	46,2	13	4,65
12.2. Кустарничково-травяно-сфагновые ( <i>aapa</i> -комплексы)	50,0	3	0,73
<b>Водные объекты</b>			
13.1. Озера и реки	100	24	10,88
13.2. Загрязненные воды	92,6	27	1,72
13.3. Отстойники	94,1	17	0,20
<b>Антропогенно преобразованные территории</b>			
14. Луга и сельхозземли	95,5	44	0,57
15. Селитебные земли	96,2	26	1,15
16. Отвалы, карьеры	82,6	23	0,35
<b>Всего</b>	64,6	780	100

В качестве источника дистанционной информации выбраны данные со спутников серии Landsat TM и ETM, имеющие большое число спектральных каналов, высокое пространственное разрешение и длительный период съемки. Территория исследований покрывается тремя сценами съемки, что требовало составления мозаики снимков. При этом для повышения информативности ДДЗ использовали различные сроки съемки, отражающие сезонные состояния растительности. Учитывая малое число безоблачных снимков для исследуемой территории при составлении мозаик, использовались снимки за 1984–2011 гг. Таким образом, мозаика, отражающая состояние наземного покрова в определенный период года, содержала сцены за разные годы, при этом актуализация мозаик осуществлена по снимкам не ранее 2005 г. Отобраны безоблачные и малооблачные снимки, близкие по дате съемки (дню и месяцу), и составлены мозаики за четыре срока: 1) конец мая – начало июня (три сцены – 03.06.2005, 14.05.2011, 03.06.1992); 2) конец июня – начало июля (три сцены – 26.06.1986, 11.07.1988, 26.06.1986); 3) август (три сцены – 21.08.2001, 02.08.2001, 18.08.2011) и 4) октябрь (четыре сцены – 09.10.1986, 18.10.1986, 09.10.1986, 26.10.1984). Подбор сцен проводился с учетом присутствующей на некоторых сценах локальной облачности, для исключения которой каждой из сцен на основе визуального анализа различных комбинаций спектральных каналов задавались маски исключения. С целью корректировки яркостей сцен при расчете мозаик проведено их гистограммное выравнивание для каждого спектрального канала съемки. Вся подготовка сцен и создание мозаик проводились в Erdas-Imagine. Проверка полученных мозаик по качеству выравнивания яркостей осуществлялась с помощью метода главных компонент с последующим гистограммным масштабированием полученных компонент, а также расчетом отношения сигнала к шуму. При расчете мозаик исходное разрешение сцен 28,5–30,0 м в пикселе в соответствии с масштабом исследования агрегировано до 60 м. Для более полного использования информации на основе спектральных каналов рассчитан ряд индексов, представленных разностями, нормализованными разностями и отношениями между каналами, имеющими наряду со спектральными каналами физическую интерпретацию: NDVI (Rouse et al., 1973); NBR (Lopez-Garcia, Caselles, 1991); SR (Birth, McVey, 1968); MSR (Chen, 1996); DVI (Tucker, 1979); GNDVI (Gitelson, Merzlyak, 1998); FMR, IOR, CMR<sup>4</sup> (Drury, 1987); NDWI (Gao, 1995); NDSI (Riggs et al., 1994); SAVI (Huete, 1988).

Совмещение полевых данных с ДДЗ и ЦМР осуществлено в ГИС, где положение полевых точек описаний сопоставлялось с положением ближайших к ним точек многослойного грид характеристик ДДЗ и ЦМР (193 характеристики), представленных в векторном точечном формате. Таким образом, была сформирована обучающая выборка, используемая для определения связей выделенных типов растительных сообществ и свойств местобитаний. При обработке данных применялись методы многомерной статистики, реализованные в пакетах прикладных программ STATISTICA, SPSS, Fracdim (параметрический

---

<sup>4</sup> Приводим пояснение для менее распространенных индексов: FMR (Ferrous Minerals Ratio) – Индекс железистых минералов, IOR (Iron Oxide Ratio) – Индекс оксидов железа, CMR (Clay Minerals Ratio) – Индекс глинистых минералов

и непараметрический корреляционный, регрессионный, дисперсионный, дискриминантный, кластерный анализы, многомерное шкалирование, анализ временных рядов и др.).

Отображением пространственной неоднородности растительного покрова является карта масштаба 1:200000, полученная на основе перевода результатов интерполяции исследуемых классов в векторный формат (ERDAS Imagine) с фильтрацией объектов площадью в один пиксель и оформлением легенды (ArcInfo). Последовательность основных этапов картографического моделирования и анализа пространственной неоднородности наземного покрова отражена на *рис. 2*.



*Рис. 2. Общая схема и этапы работы*

## Результаты

На основе геоботанических описаний выполнена эколого-фитоценотическая классификация, учитывающая структуру и состав фитоценозов, количественное соотношение компонентов сообщества (доминантов, содоминантов, экологических групп видов, ярусов), а также основные условия местообитания (увлажнение и характер субстрата). В качестве наиболее подробных картографируемых единиц для лесов и тундр использованы группы ассоциаций с перечнем доминирующих/диагностирующих видов и характеристикой основных условий местообитания, для болот – классы типов болотных массивов (Черненко и др., 2013). Легенда к карте (1: 200 000) включает 45 единиц растительного покрова, характеризующих ценотическое разнообразие лесов, березовых криволесий, болот,

горных тундр, а также 8 типов наземного покрова, лишенных или практически лишенных растительности (*рис. 3, табл. 1*).

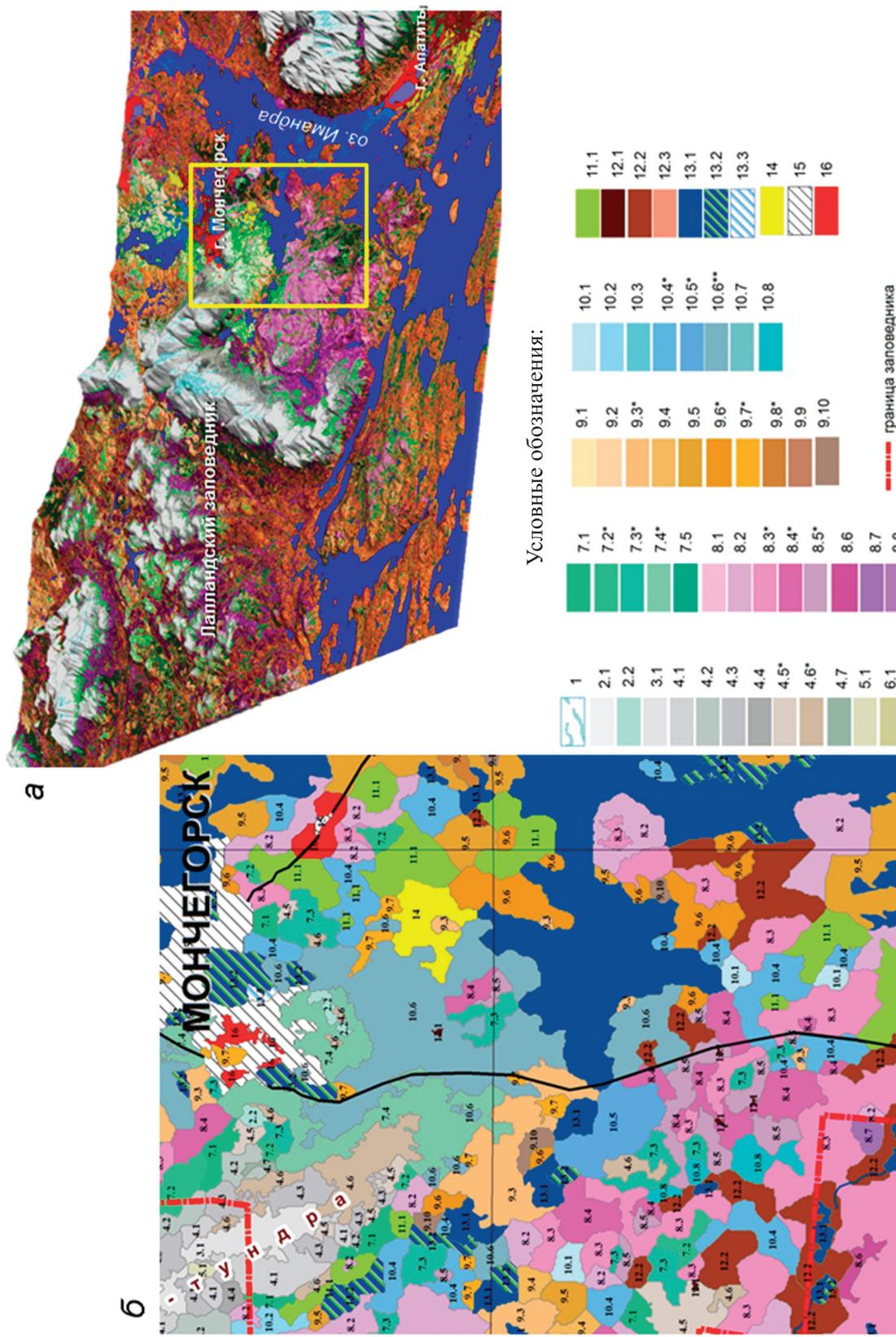
Общее относительное качество дискриминантного анализа составило 65%. При этом для разных типов сообществ относительное качество дискриминантного анализа существенно различалось. Так как часть изначально выделенных классов не нашла достаточно высокого статистического соответствия с ДДЗ и ЦМР, то дискриминантной моделью они были отнесены в разных пропорциях к другим классам. В первую очередь это относится к антропогенным производным типам растительных сообществ и заболоченным лесам.

Для всей исследуемой территории в рамках дискриминантной модели к лесным типам наземного покрова отнесено около 60% площади, из них 31% (8,3% в дигрессионной стадии) – к сосновым, 19% (3,1% в дигрессионной стадии) – к еловым и 10% (2,4% в дигрессионной и 1,2% в демутиационной стадии) – к мелколиственным лесам. При этом леса сосновые кустарничково-зеленомошные занимают наибольшую площадь (9,5%), еловые *кустарничково-зеленомошно-лишайниковые* – 7,1%, еловые кустарничково-зеленомошные – 5,6%, сосновые травяно-сфагновые – 5,2%. К снежникам и гольцовому типу наземного покрова отнесено 1,4% территории, к тундрам – 14,4% (3,5% в дигрессионной стадии), березовым криволесьям – 4,3% (2,3% в дигрессионной стадии) и болотам – 5,44 % от общей площади исследований. Водные объекты занимают около 12,8%, а антропогенно-преобразованные – порядка 2% территории (*табл. 1*). В целом к производным и преобразованным сообществам отнесено около 23% от площади территории.

Состав и распределение выделенных классов обусловлен экотопическим разнообразием региона, связанным с высотной поясностью, геоморфологическим строением, перераспределением тепла и влаги формами мезорельефа. Наряду с природной вариабельностью нашли свое отражение и антропогенные причины дифференциации растительного покрова, определившие сочетания различных дигрессионно-демутиационных серийных сообществ в окрестностях горно-металлургического комплекса. В целом общие представления о региональных особенностях растительного покрова и полевая верификация интерполяционной модели исследуемой территории оказались на высоком уровне соответствия с реальностью.

Карта растительности центральной части Мурманской области явилась результатом пространственного отображения интерполяции выделенных классов растительных сообществ и наземного покрова в результате дискриминантного анализа (*рис. 3а, б*). На карте, помимо типологического разнообразия лесов, отображены экотопическая приуроченность и динамическое состояние лесных сообществ с учетом степени их производности. Последняя характеристика реализована в матричном варианте легенды в виде апострофа или индекса (*рис. 3б*).

Выявление факторов формирования структуры и функционирования растительного покрова, а также причин его пространственной неоднородности, имеет как практическое, так и научно-теоретическое значение, в том числе для разработки норм допустимого антропогенного воздействия. Отображение факторов формирования растительного покрова



было получено в рамках дискриминантного анализа, позволившего определить вклад независимых переменных при разделении заданных классов. Двенадцать статистически достоверных дискриминантных осей описывают пространственную дифференциацию классов растительности и наземного покрова на основе комбинации 90 характеристик ДДЗ и ЦМР, вошедших в модель. Первая ось описывает 46% описанного варьирования классов, а все вместе – около 98% (табл. 2). Ниже, исходя из оценки связей дискриминантных осей с характеристиками ДДЗ, ЦМР и полевых описаний, проведена их интерпретация с точки зрения описываемой ими пространственной дифференциации выделяемых типов наземного покрова и, в частности, отдельных типов растительных сообществ.

Таблица 2. Собственные значения дискриминантных осей для нижнего уровня типизации растительности

Ось	Собственное значение	Часть объясненной дисперсии, %	Кумулятивный, %	Каноническая корреляция
1	25,777	45,9	45,9	0,981
2	9,948	17,7	63,6	0,953
3	6,033	10,7	74,3	0,926
4	4,646	8,3	82,6	0,907
5	3,295	5,9	88,5	0,876
6	2,042	3,6	92,1	0,819
7	0,882	1,6	93,7	0,685
8	0,694	1,2	94,9	0,640
9	0,610	1,1	96,0	0,616
10	0,436	0,8	96,8	0,551
11	0,335	0,6	97,3	0,501
12	0,232	0,4	97,8	0,434

Первая дискриминантная ось положительно связана с обилием и числом видов мохово-лишайникового яруса. В отношении конкретных видов наземного покрова отмечена связь с обилием следующих видов кустарничкового и мохово-лишайникового яруса: *Flavocetraria nivalis*, *Loiseleuria procumbens*, *Juncus trifidus*, *Carex bigelowii*, *Arctous alpina*, *Diapensia lapponica*, *Racomitrium lanuginosum* для местообитаний с повышенной высотой макрорельефа и при больших уклонах на всех иерархических уровнях. Ось определяется высоким отражением в инфракрасных каналах с конца мая по июль (высокие значения фотосинтетической активности и содержания влаги в растениях и почве) и низким отражением в тепловом канале в октябре, характерным для открытого снежного покрова. Таким образом, первая дискриминантная ось высокими положительными значениями характеризует растительность нивально-гольцового и горно-тундрового пояса и сообщества криволесий (рис. 4а). Отрицательными значениями ось идентифицирует водные объекты. Действительно, анализируя рисунок, замечаем повышения горных массивов как области, идентифицированные наиболее светлым цветом. Напротив, водные объекты имеют максимально темный цвет.

Вторая дискриминантная ось в наибольшей степени положительно связана с обилием и видовым разнообразием травяно-кустарничкового и мохового ярусов, а также с мощностью элювиального горизонта почвы. Ось определяется высоким отражением в средних и дальних инфракрасных каналах в конце мая – начале июня (высокое содержание влаги в наземном покрове и почве), высокой биомассой и интенсивностью фотосинтеза с конца июня по октябрь при пониженном вогнутом рельефе с отсутствием уклонов. В результате вторая дискриминантная ось высокими положительными значениями выделяет долинные и плакорные (рудеральные) луговые сообщества (рис. 4б). Соответственно, луговые и кустарничково-луговые сообщества действующих или заброшенных сельскохозяйственных угодий на рисунке выделяются наиболее светлым тоном, естественные долинные комплексы хорошо сочетаются с актуальной гидросетью. Отрицательными значениями ось выделяет нивально-гольцовый наземный покров и тундрово-гольцовые лишайниковые сообщества возвышенных позиций рельефа.

Третья дискриминантная ось в наибольшей степени положительно связана с проективным покрытием травяно-кустарничкового, мохового и древесного ярусов; числом видов древесного, травяно-кустарничкового и мохового ярусов; высотой древесного яруса и яруса подлеска; проективным покрытием подлеска ели и березы и обилием характерных лесных видов (*Pleurozium schreberi*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum palustre*, *Hylocomium splendens*, *Vaccinium uliginosum*, *Barbilophozia lycopodioides*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Dicranum scoparium*, *Empetrum hermaphroditum*, *Linnaea borealis*, *Picea obovata*). Ось определяется высокой биомассой и активностью фотосинтеза за все сроки съемки при пониженном вогнутом макрорельефе и отсутствии уклонов. Таким образом, третья дискриминантная ось высокими положительными значениями выделяет слабодренированные позиции с лесными сообществами (рис. 4в). Отрицательные значения оси выделяют тундровые и береговые сообщества, поля, луга и сильно трансформированные типы (горнорудные разработки) наземного покрова, а также гидроотстойники горнообогатительных комбинатов.

Четвертая дискриминантная ось положительно связана: с проективным покрытием, высотой и числом видов древесных ярусов; проективным покрытием и числом видов травяного и мохового ярусов; числом видов лишайникового яруса; проективным покрытием ели и сосны верхнего яруса древостоя; проективным покрытием ели и березы нижнего яруса древостоя; мощностью почвы, мощностью органосодержащего и элювиального горизонтов почвы и обилием характерных лесных видов травяно-кустарничкового яруса (*Vaccinium myrtillus*, *Pleurozium schreberi*, *V. vitis-idaea*, *Barbilophozia lycopodioides*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Linnaea borealis*, *Hylocomium splendens*, *V. uliginosum*). Ось определяется высокой интенсивностью фотосинтеза в конце мая – начале июня и высоким значением индекса содержания глинистых минералов в конце мая – начале июня и в июле. В результате четвертая ось высокими значениями выделяет лесные экосистемы, принадлежащие к сосново-еловым сообществам с развитым подлеском, а также, возможно, к короткопроизводным сообществам на одной из заключительных сукцессионных

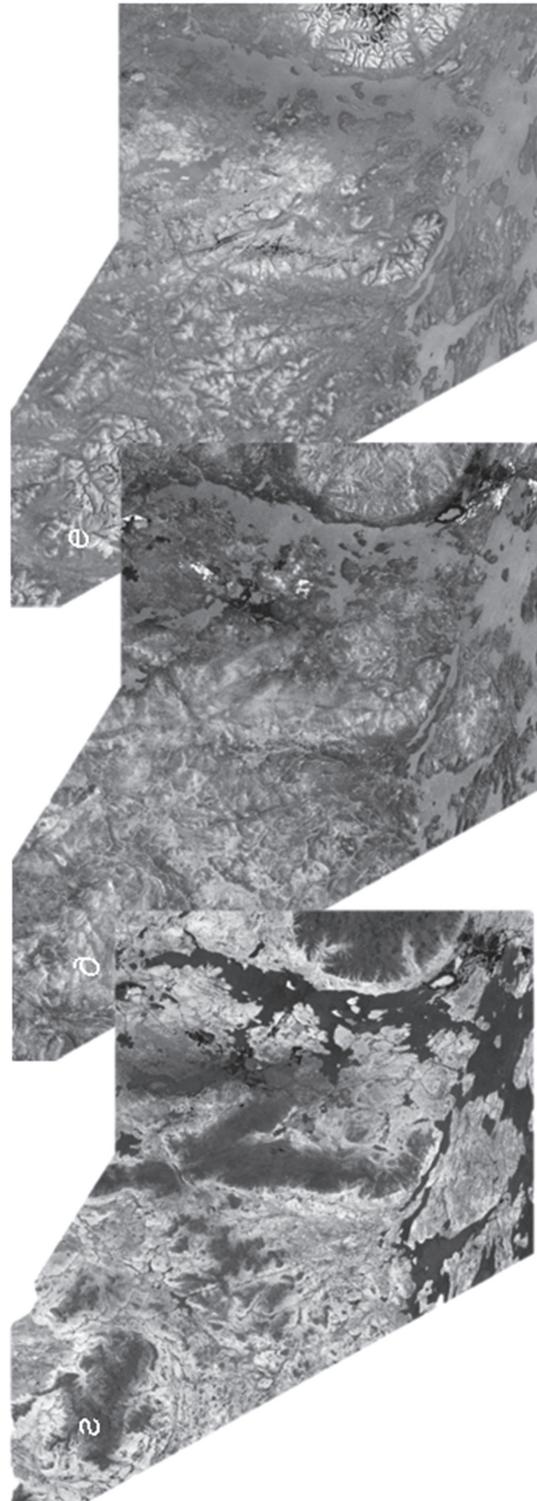
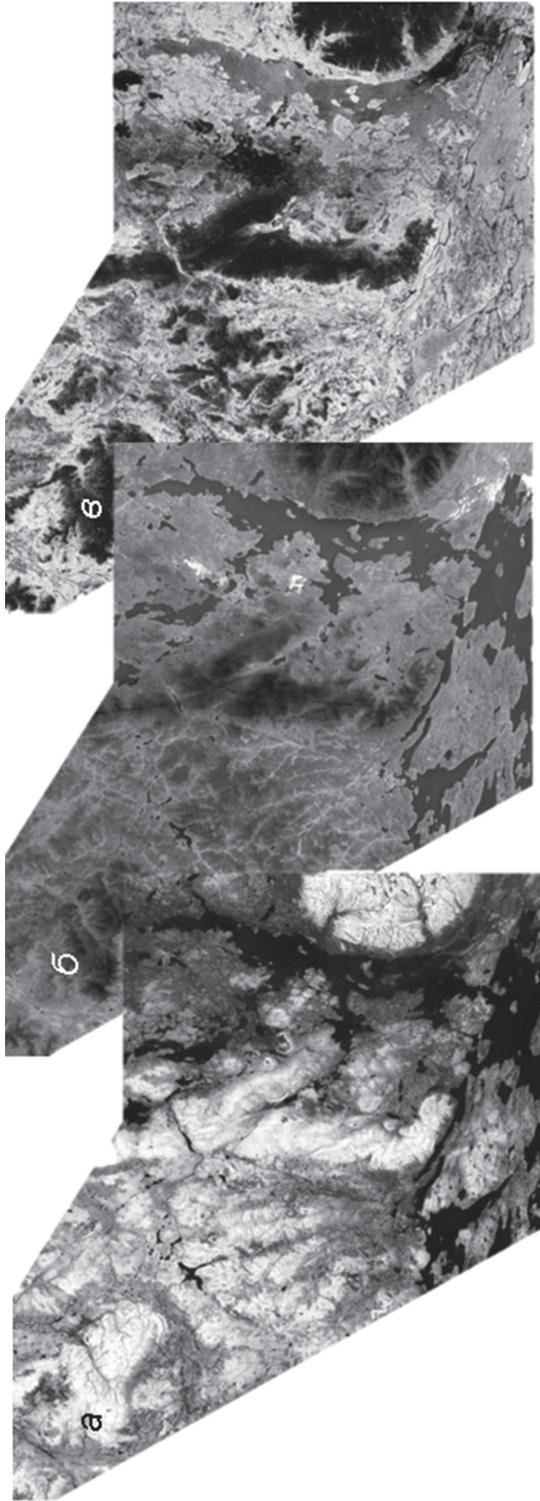
стадий (рис. 4г). Отрицательные значения оси выделяют селитебные и антропогенно-трансформированные типы наземного покрова.

Пятая дискриминантная ось положительно связана с обилием следующих видов трав и кустарничков: *Avenella flexuosa*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Gymnocarpium dryopteris*. Ось определяется высокой интенсивностью фотосинтеза растительного покрова в июле в местообитаниях с пониженным тепловым потоком в конце мая – начале июня при выпуклом макрорельефе. Таким образом, пятая ось наиболее высокими значениями выделяет сельхозземли, а также редколесья и тундрово-гольцовые сообщества, низкими – карьеры и берега «отстойников» (рис. 4д).

Шестая дискриминантная ось положительно связана с проективным покрытием и числом видов лишайников, а также с обилием видов, характерных для сообществ верхнего предела леса (*Juncus trifidus*, *Flavocetraria nivalis*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Carex bigelowii*, *Pohlia nutans*, *Andreaea rupestris*). Ось определяется высоким отражением в средних инфракрасных и тепловом спектральных диапазонах с конца мая по июль и высокой интенсивностью фотосинтеза в конце мая – начале июня. Исходя из этого, шестая ось высокими значениями выделяет антропогенно обусловленные редколесья, горные криволесья, тундры и тундрово-гольцовые сообщества, низкими – гольцово-нивальный и гольцовый типы наземного покрова (рис. 4е).

Седьмая дискриминантная ось положительно связана с обилием видов тундрового и горно-тундрового пояса (*Loiseleuria procumbens*, *Dicranum majus*, *Flavocetraria nivalis*, *Juncus trifidus*, *Arctous alpina*, *Cetraria aculeata*, *Avenella flexuosa*, *Carex bigelowii*) и определяется высоким отражением в визуальном диапазоне спектра в июле и высокими значениям «водного» индекса в конце мая – начале июня. Таким образом, седьмая дискриминантная ось высокими положительными значениями выделяет тундровые и тундрово-гольцовые сообщества с разной степенью сомкнутости напочвенного покрова и хвостохранилища, приближающиеся по отражательным характеристикам к естественным горно-тундровым сообществам с отдельными фрагментами растительного покрова (рис. 4ж). Отрицательные значения оси выделяют гольцовый (субнивальный) тип наземного покрова, в меньшей степени – гари.

Восьмая дискриминантная ось положительно связана с проективными покрытиями лишайников, сосны в нижнем ярусе древостоя, нижнего яруса древостоя в целом, низкими значениями жизненного состояния древостоя, высотой и числом видов нижнего яруса древостоя и обилием видов раннесукцессионных стадий (*Pohlia nutans*, *Trapeliopsis granulosa*, *Cladonia uncialis*, *Diphasiastrum complanatum*, *Cladonia cenotea*, *Arctostaphylos uva-ursi* и *Stereocaulon condensatum*). Ось определяется высокой активностью фотосинтеза в конце мая – начале июня при пониженных высотах и отсутствии уклонов рельефа. В результате, восьмая дискриминантная ось высокими положительными значениями выделяет сосновые леса, возникшие в результате антропогенного воздействия (загрязнения в результате работы комбинатом, пожаров). Области с четкой визуализацией этих сообществ хорошо заметны в окрестностях г. Мончегорска и выделяются светлыми участками



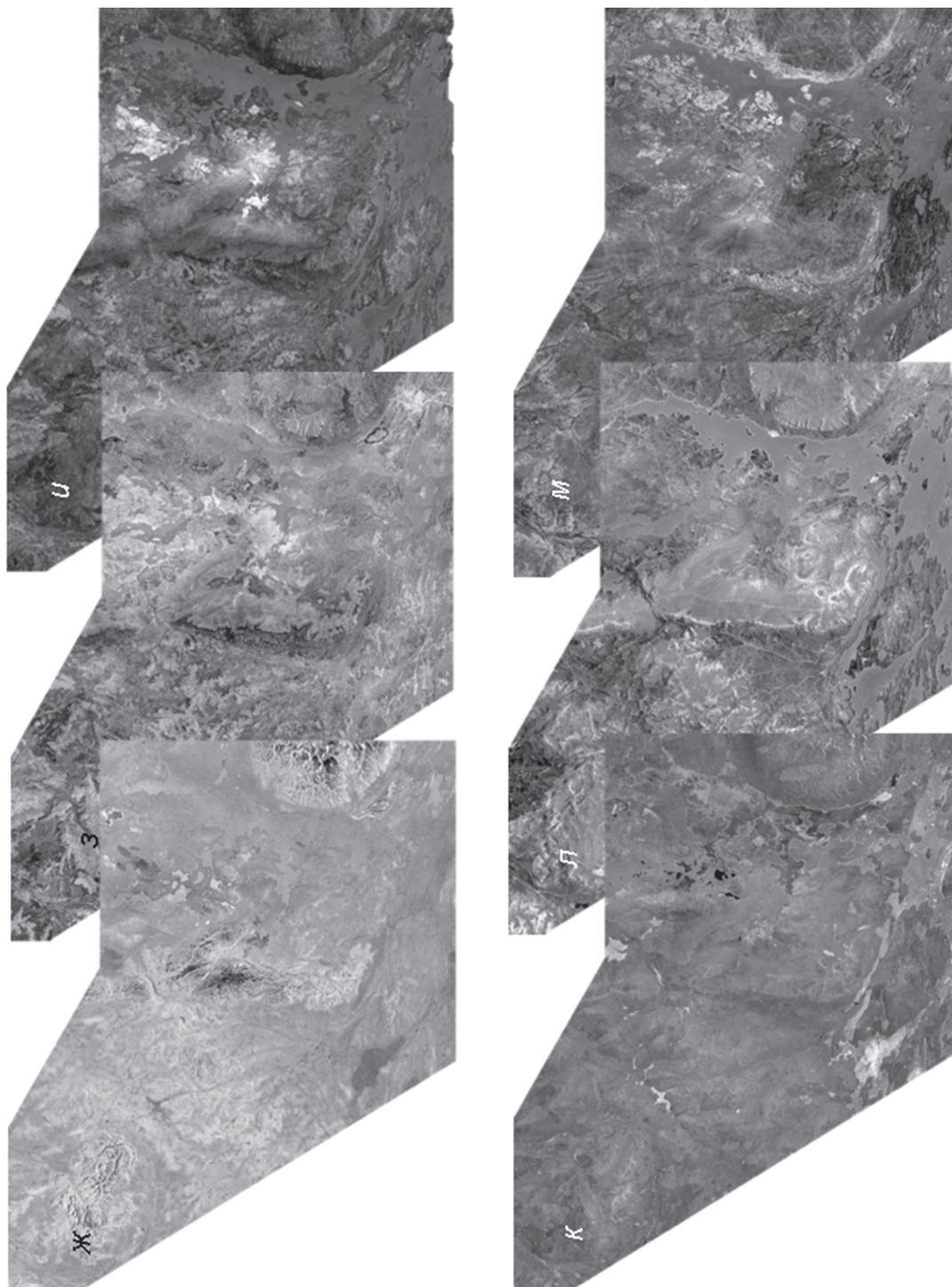


Рис. 4. Интерпретация содержания дискриминантных осей на основе полевых описаний, ДДЗ и ЦМР. Дискриминантные оси с первой (а) по двенадцатую (м)

обширных территорий. Отрицательными значениями ось выделяет узкие полосы предгорных хвойных с участием березовых лесов кустарничково-зеленомошного типа, особенно хорошо заметных в нижней части западного склона горного массива Мончегундр и Лавозерских тундр (рис. 4з).

Девятая дискриминантная ось положительно связана с проективным покрытием лишайников и обилием видов, также характерных для раннесукцессионных стадий или длительнопроизводных сообществ (*Pohlia nutans*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Trapeliopsis granulosa*, *Juncus trifidus*, *Carex bigelowii* и *Stereocaulon alpinum*). Ось определяется высоким тепловым потоком с конца мая по июль при восточных экспозициях макрорельефа. Таким образом, девятая дискриминантная ось высокими положительными значениями выделяет свежие гари, связанные с антропогенным воздействием. Отрицательными значениями ось выделяет предгорные лесные сообщества (рис. 4и).

Десятая дискриминантная ось положительно связана с обилием видов высокотравья и характерными приручьевыми местообитаниями в богатых трофических условиях (*Angelica sylvestris*, *Melica nutans*, *Solidago lapponica*, *Geranium sylvaticum*, *Dactylorhiza maculata*), что дает основание отнести высокие значения данной дискриминантной оси к приозерным и приручьевым растительным сообществам. Низкими значениями выделяются загрязненные стоками горно-обогачительных комбинатов водные объекты, что хорошо обнаруживается в виде темно окрашенных озер вблизи комбината «Североникель» и по распределению загрязненных потоков воды в оз. Имандра (рис. 4к).

Одиннадцатая ось положительно связана с проективным покрытием ели для верхнего яруса древостоя и рябины в подлеске, числом видов травяно-кустарничкового яруса и обилием видов мезофитного разнотравья (*Chamaepericlymenum suecicum*, *Geranium sylvaticum*, *Angelica sylvestris*, *Orthilia secunda*, *Dicranum majus*, *Loiseleuria procumbens*, *Hieracium* sp.). Ось определяется повышенными высотами и уклонами рельефа при низкой активности фотосинтеза в конце мая – начале июня и в октябре. В результате, одиннадцатая дискриминантная ось высокими значениями выделяет предгорные еловые леса совместно с сообществами речных долин и берегов озер. Низкими значениями оси выделяются эутрофные (прибрежные) болота (рис. 4л).

Двенадцатая дискриминантная ось положительно связана с проективными покрытиями рябины, березы для верхнего яруса древостоя и обилием *Pleurozium schreberi*, *Solidago virgaurea*, *Linnaea borealis*, *Hylocomium splendens*. Ось определяется повышенными высотами и уклонами мезо- и микрорельефа и пониженной биомассой. Таким образом, двенадцатая дискриминантная ось высокими значениями выделяет естественные мелколиственные лесные сообщества короткопроизводных серий на склонах гор и их аналоги, возникшие в результате антропогенного воздействия (рис. 4м). Низкими значениями оси выделяются заболоченные леса и мезотрофные болота.

Таким образом, анализ содержания двенадцати дискриминантных осей показал, что основными факторами дифференциации современного растительного покрова модельной территории являются климатические высотные градиенты, антропогенные

нарушения, водный режим, определяемый преимущественно формами рельефа различных иерархических уровней, и естественное саморазвитие растительных сообществ. Статистическая оценка вклада данных факторов с содержательной их интерпретацией со стороны ботанической, почвенной и ландшафтной информации позволила выявить естественную и антропогенную динамику природных сообществ и механизмы их устойчивости.

### Заключение

На основе наземных и дистанционных данных были выявлены закономерности и факторы формирования типологического разнообразия растительного покрова на примере территории центральной части Мурманской области. Методами статистического моделирования была создана карта актуальной растительности исследуемого региона – бассейна оз. Имандра (масштаб 1:200 000), характеризующая большую часть Лапландского заповедника, территории горного массива Хибин, а также антропогенно трансформированные окрестности металлургического комбината. Карта дает не только представление о составе и распространении естественных и антропогенно нарушенных растительных сообществ, но и возможность количественно оценить площадь нарушенной территории. Анализ полученной карты и физического содержания дискриминантных осей показал, что около 23% исследуемой территории представлено производными сообществами антропогенного происхождения различной степени модификации и трансформации.

Использование различных источников пространственных данных о состоянии растительного и наземного покрова, наряду с использованием методов статистического анализа, позволило не только разработать карту растительного покрова, но и выделить основные факторы его дифференциации на региональном уровне, влияние фактора хозяйственной деятельности человека на преобразование естественного состава и структуры растительного покрова.

Полученные знания являются основой для понимания условий и процессов природной и антропогенной трансформации растительного покрова, его пространственной и временной динамики, что важно для моделирования его состояния и обоснования системы мониторинга. Использование количественного подхода делает возможным использовать полученные результаты для проведения сравнительного анализа экосистемного разнообразия бореальных лесов на региональном уровне в разных природно-климатических регионах и выявления общих закономерностей пространственной структуры восточноевропейских бореальных лесов в целом для создания их общей картографической и факторной моделей.

**Благодарности.** Исследования выполнялись при поддержке грантов Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем», грантов РФФИ 11-04-01093, 14-04-98810 р\_север\_a, 16-05-00142 в части методики факторного анализа и гранта РФФИ 14-27-00065 в части анализа данных.

Авторы благодарят коллег Е.В. Басову, Н.Е. Королеву, М.С. Малинину, Е.А. Боровичева, А.В. Мелехина, И.А. Степанова, принимавших участие в сборе или обработке полевых материалов.

## Литература

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
2. *Игнатов М.С., Афонина О.М.* Список мхов территории бывшего СССР // *Arctoa*. 1992. Т. 1. № 1–2. С. 1–87.
3. *Константинова Н.А., Потемкин А.Д., Шляков Р.Н.* Список печеночников и антоцеротовых территории бывшего СССР // *Arctoa*. 1992. Т. 1. № 1–2. С. 87–127.
4. *Королева Н.Е.* Растительность Мурманской области как компонент биоразнообразия // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 1. С. 153–166.
5. *Ласточкин А.Н.* Рельеф земной поверхности. Л.: Недра, 1991. 339 с.
6. *Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю.* Синтаксономическое разнообразие сосновых лесов Лапландского заповедника // Бот. журн. 2002. Т. 87. № 1. С. 99–106.
7. *Пузаченко М.Ю.* Оценка состояния лесов на основе полевой и дистанционной информации на примере юго-запада Валдайской возвышенности // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления. Мат. Всероссийской науч. конф. (с международным участием). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 79–81.
8. *Пузаченко Ю.Г.* Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997. № 2. С. 24–40.
9. *Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: АСАДЕМА, 2004. 416 с.
10. *Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М., Молчанов Г.С.* Многомерный анализ аэрофотоснимков при изучении структуры ландшафта // Изв. РАН. Сер. географ. 1999. № 2. С. 80–91.
11. *Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29.
12. *Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.* Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. Общ. Биол. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
13. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. М.-Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного ун-та, 1998. 271 с.
14. *Сысуев В.В.* Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Изв. РАН. Сер. географ. 2003. № 4. С. 36–50.
15. *Сысуев В.В.* Моделирование геофизической дифференциации геосистем // География, общество, окружающая среда. Том. 2. Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Изд. дом Городец, 2004. С. 48–70.
16. *Тишков А.А.* Актуальная биогеография как методологическая основа сохранения биоразнообразия // Вопросы географии. Сборник 134. М.: Изд. Дом «Кодекс», 2012. С. 15–57.
17. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига, 2005. 248 с.
18. *Хакен Г.* Синергетика. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 406 с.
19. *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). С.-Пб. 1995. 992 с.
20. *Черненькова Т.В., Басова Е.В., Бочкарев Ю.Н., Пузаченко М.Ю.* Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель» // Лесоведение. 2009. № 6. С. 38–45.
21. *Черненькова Т.В., Кабиров Р.Р., Басова Е.В.* Восстановительные сукцессии северотаежных ельников при снижении аэротехногенной нагрузки // Лесоведение. 2011. № 6. С. 49–66.
22. *Черненькова Т.В., Пузаченко М.Ю., Королева Н.Е., Басова Е.В.* Оценка состояния лесного покрова Мурманской области на основе наземных исследований и дистанционной информации // Лесоведение, 2013. № 5. С. 86–96.
23. *Шарая Л.С., Шарый П.А.* Использование морфометрических статистик для описания внутренней геометрии равнинных и горных местностей // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2003. Т. 5. № 2. С. 278–286.
24. Электронный учебник по статистике. М.: StatSoft, Inc., 2001. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
25. *Bailey R.G.* Identifying Ecoregion Boundaries. *Environmental Management*. 2005. Vol. 34 (1). P. 14–26.
26. *Birth G., McVey G.* Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer // *Agronomy Journal*. 1968. No. 60. P. 640–643.
27. *Chen J.* Evaluation of Vegetation Indices and Modified Simple Ratio for Boreal Applications // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1996. No. 22. P. 229–242.
28. *Chernenkova T.V., Puzachenko M.Yu., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G.* An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales // *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*. 2015. Vol. 4 (1). P. 1–10
29. *Chemin Y.* Evapotranspiration of crops by remote sensing using the energy balance based algorithms. *International Yellow River Forum (IYRF) on River Basin Management, Zhengzhou, China*, 2003. P. 76–85.

30. *Drury S.* Image Interpretation in Geology. London: Allen and Unwin, 1987. 243 p.
31. *Fatoyinbo T.E., Simard M., Washington-Allen R.A., Shugart H.H.* Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data // *J. Geophys. Res.* Vol. 113. G02S06. 2008. DOI: 10.1029/2007JG000551.
32. *Gao B.* Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // *Proceedings of SPIE* 2480. 1995. P. 225–236.
33. *Gitelson A., Merzlyak M.* Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves // *Advances in Space Research.* 1998. No. 22. P. 689–692.
34. *Huete A.* A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment.* 1988. No. 25. P. 295–309.
35. *Kay J.J., Fraser R.A.* Exergy Analysis of Ecosystems: Final Draft Establishing a Role for Thermal Remote Sensing. University of Waterloo. Ontario, Canada. 2001. 79 p.
36. *Lawley V., Lewis M., Clarke K., Ostendorf B.* Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review // *Ecol. Indicators.* 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.021>.
37. *Lopez-Garcia M., Caselles V.* Mapping Burns and Natural Reforestation using Thematic Mapper Data // *Geocarto International*, 1991. No. 6. P. 31–37.
38. *McRoberts R.E.* A model-based approach to estimating forest area. *Remote Sensing of Environment.* 2006. No. 103. P. 56–66.
39. *Mücher C.A., Klijn J.A., Wascher D.M., Chaminée J.H.J.* A new European Landscape Classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes. *Ecological Indicators* 10. 2010. P. 87–103.
40. *Pinto-Correia T., Cancela d'Abreu A., Oliveira R.* Landscape Units in Portugal and the development and application of Landscape Indicators. *Dramstad W., Sogge C. (Eds.). Agricultural Impacts on Landscapes. Developing Indicators for Policy Analysis.* NIJOS/OECD, NIJOS 7/2003, Oslo. 2003.
41. *Riggs G., Hall D., Salomonson V.* A Snow Index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer // *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'94.* Vol. 4: Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation. 1994. P. 1942–1944.
42. *Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA.* 1973. P. 309–317.
43. *Santesson R.* The lichens and lichenicolous fungi of Sweden and Norway. Lund. 1993. 240 p.
44. *Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M.* Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment.* 2008. No. 112. P. 1982–1999.
45. *Tucker C.* Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation // *Remote Sensing of Environment.* 1979. No. 8. P. 127–150.
46. *Turcotte D.L.* Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Second edition. Cambridge: Un. Press. 1997. 398 p.
47. *van Eetvelde V., Antrop M.* Landscape character beyond landscape typologies. Methodological issues in trans-regional integration in Belgium. *Proceedings of the 18th International Annual ECLAS Conference, 2007.* P. 229–239.
48. *Jorgensen S.V., Svirezhev Y.M.* Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Elsevier Ltd. The Boulevard, Langford Lane Kidlington. Oxford OX5 1GB UK. 2004. 369 p.

## **Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region**

**M.Yu. Puzachenko<sup>1</sup>, T.V. Chernenkova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Geography, RAS, Moscow 119017, Russia*  
E-mail: [puzak@bk.ru](mailto:puzak@bk.ru)

<sup>2</sup>*Centre for Forest Ecology and Production RAS, Moscow 117997, Russia*  
E-mail: [chernenkova50@mail.ru](mailto:chernenkova50@mail.ru)

The work is devoted to the identification of regularities of formation of the typological diversity of vegetation through the use of digital elevation models (DEM), field and remote sensing data (RSD). The study area is located in the central part of Murmansk Region and covers the greater part of the Lapland Nature Reserve, the Khibiny Massif, as well as the neighborhood of a metallurgical plant. The results of stepwise discriminant analysis demonstrated the possibility to identify the relatively large number of natural and anthropogenic damaged types of plant communities at the level of groups of associations. The map of actual vegetation of the study region (scale 1:200 000) was created. The analysis of the obtained map showed that about 23% of the study area were anthropogenically transformed plant communities

of varying degrees of transformation. The ecologo-phytocoenotic approach, used for the classification, allows to reflect in the legend of the map the information about natural and transformed plant communities of different ecological condition. The use of different spatial data sources, along with the use of methods of statistical analysis, makes it possible not only to develop a map of vegetation cover, but also to highlight key driving forces at the regional level, among which the main ones are the climatic altitude gradients, water supply conditions, anthropogenic transformations and natural self-development of plant communities.

**Keywords:** forest cover, diversity, ecosystem variation, mapping, classification, remote sensing data, DEM, Murmansk region

Accepted: 18.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191

## References

1. Bartalev S.A., Loupian E.A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
2. Ignatov M.S., Afonina O.M., Spisok mhov territorii byvshego SSSR (List of the mosses of the former USSR), *Arctoa*, 1992, Vol. 1, No. 1–2, pp. 1–87.
3. Konstantinova N.A., Potemkin A.D., Shlyakov R.N., Spisok pechenochnikov i antotserotovykh territorii byvshego SSSR (Spisok liverworts and antocerot mosses of the former USSR), *Arctoa*, 1992, Vol. 1, No. 1–2, pp. 87–127.
4. Koroleva N.E., Rastitel'nost' Murmanskoi oblasti kak komponent bioraznoobraziya (The vegetation of the Murmansk region as a component of biodiversity), *Vestnik MGTU*, 2009, Vol. 12, No. 1, pp. 153–166.
5. Lastochkin A.N., *Rel'ef zemnoi poverkhnosti* (Landform), Leningrad: Nedra, 1991, 339 p.
6. Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu., Sintaksonomicheskoe raznoobrazie sosnovykh lesov Laplandskogo zapovednika (Sintaksonomicheskoe variety of pine forest Lapland nature reserve), *Bot. zhurn*, 2002, Vol. 87, No. 1, pp. 99–106.
7. Puzachenko M.Yu., Otsenka sostoyaniya lesov na osnove polevoi i distantsionnoi informatsii na primere yugozapada Valdaiskoi vozvyshennosti (Forest assessment, based on field and distance information on the example of the South-East of Valdai hills), *Lesnye resursy taezhnoi zony Rossii: problemy lesopol'zovaniya i lesovosstanovleniya. Proc. Conf.*, Petrozavodsk: KarNC RAN, 2009, pp. 79–81.
8. Puzachenko Yu.G., Prilozhenie teorii fraktalov k izucheniyu struktury landshafta (Application of fractals theory to the study of the structure of the landscape), *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 1997, No. 2, pp. 24–40.
9. Puzachenko Yu.G., *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* (Mathematical methods in ecological and geographical research), Moscow: ACADEMA, 2004, 416 p.
10. Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Molchanov G.S., Mnogomernyi analiz aerofotosnimkov pri izuchenii struktury landshafta (Multivariate analysis of aerial photos when studying the structure of the landscape), *Izveitiya RAN, Ser. geograf.*, 1999, No. 2, pp. 80–91.
11. Puzachenko Yu.G., Sandler'skii R.B., Krenke A.N., Puzachenko M.Yu., Mul'tispektral'naya distantsionnaya informatsiya v issledovanii lesov (Multispectral remote information in the study forests), *Lesovedenie*, 2014, No. 5, pp. 13–29.
12. Sandler'skii R.B., Puzachenko Yu.G., Termodinamika biogeotsenozov na osnove distantsionnoi informatsii (Thermodynamics of sites based on distance information), *Zhurnal Obshch. Biol.*, 2009, Vol. 70, No. 2, pp. 121–142.
13. Simonov Yu.G., *Morfometricheskii analiz rel'efa* (Morphometric analysis of relief), Moscow-Smolensk: Izd-vo Smolenskogo gumanitarnogo un-ta, 1998, 271 p.
14. Sysuev V.V., Morfometricheskii analiz geofizicheskoi differentsiatsii landshaftov (Morphometric analysis of geophysical landscape differentiation), *Izvestiya RAN, Ser. geograf.*, 2003, No. 4, pp. 36–50.
15. Sysuev V.V., Modelirovanie geofizicheskoi differentsiatsii geosistem (Geophysical modeling of geosystems differentiation), In: *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda, Vol. 2, Funktsionirovanie i sovremennoe sostoyanie landshaftov*, Moscow: Izd. dom Gorodec, 2004, pp. 48–70.
16. Tishkov A.A., Aktual'naya biogeografiya kak metodologicheskaya osnova sokhraneniya bioraznoobraziya (Actual biogeography as a framework for the conservation of biodiversity), *Voprosy geografii*, Sbornik No. 134, Moscow: Izd. Dom "Kodeks", 2012, pp. 15–57.
17. Haken H., *Informatsiya i samoorganizatsiya. Makroskopicheskii podkhod k slozhnym sistemam* (Information and self-organization. Macroscopic approach to complex systems), Moscow: KomKniga, 2005, 248 p.
18. Haken H., *Sinergetika* (Sinergetica), Moscow: Mir, 1980, 406 p.
19. Cherepanov S.K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* (Vascular plants of Russia and the adjacent States (within the former Soviet Union), Saint-Petersburg, 1995, 992 p.
20. Chernen'kova T.V., Basova E.V., Bochkarev Ju.N., Puzachenko M.Ju. Otsenka bioraznoobraziya lesov v zone vliyaniya gorno-metallurgicheskogo kombinata "Severonikel" (Assessment of forest biodiversity in the zone of influence of mining-metallurgical plant "Severonikel"), *Lesovedenie*, 2009, No. 6, pp. 38–45.
21. Chernen'kova T.V., Kabirov R.R., Basova E.V., Vosstanovitel'nye suksessii severotaezhnykh el'nikov pri snizhenii aerotekhnogennoi nagruzki (Regeneration Successions of Northern Taiga Spruce Forests under Reduction of Aerotechnogenic Impact), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 49–66.
22. Chernen'kova T.V., Puzachenko M.Ju., Koroleva N.E., Basova E.V., Ocenka sostojaniya lesnogo pokrova Murmanskoi oblasti na osnove nazemnykh issledovaniy i distantsionnoj informatsii (Assessment of Forest Spatial Differentiation in Murmansk Province using Field Surveys and Remote Sensing Data), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 86–96.

23. Sharaya L.S., Sharyi P.A., Ispol'zovanie morfometricheskikh statistik dlya opisaniya vnutrennei geometrii ravninykh i gornykh mestnostei (Use statistics to describe internal morphometric geometry lowland and mountainous areas), *Izvestiya Samarskogo nauch. centra RAN*, 2003. Vol. 5, No. 2, pp. 278–286.
24. *Jelektronnyj uchebnik po statistike* (Electronic statistics textbook), Moscow: StatSoft, Inc., 2001, available at: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
25. Bailey R.G., Identifying Ecoregion Boundaries, *Environmental Management*, 2005, Vol. 34, No. 1, pp. 14–26.
26. Birth G., McVey G., Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer, *Agronomy Journal*, 1968, No. 60, pp. 640–643.
27. Chen J., Evaluation of Vegetation Indices and Modified Simple Ratio for Boreal Applications, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996, No. 22, pp. 229–242.
28. Chernenkova T.V., Puzachenko M.Yu., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G., An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales, *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, 2015, Vol. 4, No. 1, pp. 1–10.
29. Chemin Y., Evapotranspiration of crops by remote sensing using the energy balance based algorithms, *International Yellow River Forum on River Basin Management*, Zhengzhou, China, 2003, pp. 76–85.
30. Drury S., *Image Interpretation in Geology*, London: Allen and Unwin, 1987, 243 p.
31. Gao B., Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space, *Proceedings of SPIE 2480*, 1995, pp. 225–236.
32. Fatoyinbo T.E., Simard M., Washington-Allen R.A., Shugart H.H., Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, G02S06, 2008. DOI:10.1029/2007JG000551
33. Gitelson A., Merzlyak M., Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves, *Advances in Space Research*, 1998, No. 22, pp. 689–692.
34. Huete A., A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, No. 25, pp. 295–309.
35. Kay J.J., Fraser R.A., *Exergy Analysis of Ecosystems: Final Draft Establishing a Role for Thermal Remote Sensing*, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2001, 79 p.
36. Lawley V., Lewis M., Clarke K., Ostendorf B., Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review, *Ecol. Indicators.*, 2015, URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.021>.
37. Lopez-Garcia M., Caselles V., Mapping Burns and Natural Reforestation using Thematic Mapper Data, *Geocarto International*, 1991, No. 6, pp. 31–37.
38. McRoberts R.E., A model-based approach to estimating forest area. *Remote Sensing of Environment*, 2006, No. 103, pp. 56–66.
39. Múcher C.A., Klijn J.A., Wascher D.M., Chaminée J.H.J., A new European Landscape Classification (LAN-MAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes, *Ecological Indicators 10*, 2010, pp. 87–103.
40. Pinto-Correia T., Cancela d'Abreu A., Oliveira R., Landscape Units in Portugal and the development and application of Landscape Indicators, Dramstad W., Sogge C. (Eds.), *Agricultural Impacts on Landscapes. Developing Indicators for Policy Analysis*, NIJOS/OECD, NIJOS 7/2003, Oslo, 2003.
41. Riggs G., Hall D., Salomonson V., A Snow Index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'94. Vol. 4: Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation*, 1994, pp. 1942–1944.
42. Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Third ERTS Symposium, NASA*, 1973, pp. 309–317.
43. Santesson R., *The lichens and lichenicolous fungi of Sweden and Norway*, Lund, 1993, 240 p.
44. Tucker C., Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, No. 8, pp. 127–150.
45. Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M., Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases, *Remote Sensing of Environment*, 2008, No. 112, pp. 1982–1999.
46. Turcotte D.L., *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Second edition, Cambridge: Un. Press, 1997, 398 p.
47. van Eetvelde V., Antrop M., Landscape character beyond landscape typologies. Methodological issues in trans-regional integration in Belgium, *Proceedings of the 18th International Annual ECLAS Conference*, 2007, pp. 229–239.
48. Jorgensen S.V., Svirezhev Y.M., *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*, Elsevier Ltd. The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB UK, 2004, 369 p.