

Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г.

## ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Целью работы является демонстрация и развитие этого метода многомерного анализа дистанционной информации на примере одной сцены Landsat 7 от 6 июня 2005 года для низовьев р. Надым (с географическими координатами: верхний левый угол сцены = широта +66.6356352, долгота +71.4716750, нижний правый угол сцены = широта +64.5346262 долгота +73.7916777), приведенной к разрешению масштаба 1:200 000 (площадь одного пикселя 210x210 м). В отличие от ранее выполненных работ в данном случае при классификации используются не только значения яркостей в каналах, но и построенные на их основе индексы, представляющие собой, в большинстве случаев, нормализованные значения разностей между соседними каналами или их отношения.

На ряду со значениями собственно каналов используются следующие индексы:

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

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

$DVI = b4 - b3$  - разностный вегетационный индекс;

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

$GreenNDVI = (b4 - b2) / (b4 + b3)$  (Зеленый NDVI) -. очень чувствителен к концентрациям хлорофилла;

$TVI = [(b4 - b3) / (b4 + b3) + 0.5]^{1/2} * 100$  интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, транспирация, типы растительности

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

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

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

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

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

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

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

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

$SWIR1\_G=b5/b2$  различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли;

$SWIR2/R =b7/b3$  дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты

$SWIR1 =b7/b5$  глинистые отложения и горные породы, богатые глиной  
 $BR =0.33183*b1+0.33121*b2+0.55177*b3$

$+0.42514*b4+0.48087*b5+0.25252*b7$  Общая яркость, альbedo (яркость)

$GR =-0.24717*b1-0.16263*b2-0.40639*b3 +0.85468*b4+0.05493*b5-0.11749*b7$  Интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, (зеленость)

$WET =0.13929*b1+0.22490*b2+0.40359*b3 +0.25178*b4-0.70133*b5-0.45732*b7$  Содержание влаги в зеленой фитомассе (влажность)

Таким образом, каждый пиксель грида земной поверхности характеризуются значениями отраженной радиации в различных каналах, их разностями и отношениями.

Постановка задачи.

Проектно-изыскательские работы освоения природных ресурсов требуют достаточно детальной характеристики современного состояния ландшафтного покрова в среднем и крупном масштабе и отображения его важнейших свойств, прямо или косвенно определяющих эффективность и условия реализации хозяйственной деятельности с соблюдением стандартов, определяемых концепцией устойчивого развития. На начальном этапе эта работа должна осуществляться без посещения собственно территории, ограничиваясь только дистанционной информацией, общегеографическими знаниями и существующими обычно мелкомасштабными специальными картами с минимальной стоимостью и достаточным качеством конечного продукта.

*Технологическое решение.* Основой решения задачи является пошаговая дихотомическая итеративная классификация на множестве значений заданных переменных по избранной дистанции. Элементом классифицируемого множества является пиксель с присвоенными ему значениями переменных. В зависимости от задачи и свойств распределения, способа представления переменных могут использоваться различные дистанции. Чаще всего используются стандартная дистанция Эвклида, оценившая различия между элементами по «многомерному объему» и дистанция на основе нормированного скалярного произведения значений переменных (метрика Буняковского), оценивающая различия по подобию формы многомерного отображения. Процедура на первом шаге выбирает два удаленных друг от друга элемента и на основе величины дистанции относит все остальные элементы или к первому или ко второму классу. На втором шаге для каждого полученного множества рассчитывается многомерный центр тяжести. Далее процедура разделение элементов по их дистанциям повторяется относительно выделенных двух центров тяжести. На третьем шаге рассчитываются новые центры тяжести и по отношению к ним вновь

перераспределяются все элементы. Так продолжается до тех пор пока разницы между центрами тяжести одноименных классов не будет пренебрежимо мало отличаться от нуля, или перечни элементов, принадлежащие к множествам остаются неизменными. Процедура не сходится к пределу, если многомерное множество строго нормально и соответственно никаких внутри него различимых классов не существует. Далее эта процедура применяется независимо к каждому выделенному на первом этапе подмножеству и т.д. до требуемого уровня. Преимущества предлагаемой процедуры состоит в том, что она никак не зависит от параметров распределения и фактически не ограничивается каким-либо количественным порогом. Выделенные классы определяются только принятой метрикой и конфигурацией множества в пространстве переменных.

Методология

Яркости каналов и значения индексов частично коррелируют друг с другом, если какие либо каналы и индексы имеют высокую корреляцию, то при классификации их вес будет завышен, а вес независимых от них каналов занижен. Это приведет к снижению разнообразия выделяемых классов. Максимальное разнообразие может быть получено только в том случае, когда переменные, по которым осуществляется классификация, независимы друг от друга. Чтобы избежать потери разнообразия выделяемых классов и вместе с тем сохранить информацию, содержащуюся в переменных, необходимо уменьшить размерность, то есть представить все множество переменных через описывающие их независимые компоненты. Эта задача решается методами главных компонент, факторным анализом или многомерного шкалирования (Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях М.: АСАДЕМА, 2004.).

Формально первые два метода применимы для нормальных выборок и линейных отношений между переменными. Применение их для систем, не отвечающих этим требованиям, приводит к искажению отображения. Суть этих искажений сводится к тому, что нелинейные составляющие отношений и отклонения от нормальности увеличивают размерность и выделяют независимые компоненты, имеющие трудно интерпретируемый физический смысл. Вместе с тем методы главных компонент и факторный анализ технически существенно проще многомерного шкалирования и легко реализуется в стандартных пакетах статистического анализа. С другой стороны они позволяют особо рассмотреть физический смысл нелинейных эффектов.

Из табл. 1 следует, что операция вращения перераспределила нагрузки таким образом, что первый фактор вместо 99,5% описывает 42,9%, второй 31,6% и третий – 19,4% общего варьирования всех переменных. В сумме первые три фактора описывают 93,9% варьирования, что несколько меньше, чем при варианте без вращения. Четвертый и пятый факторы описывают по 2% варьирования, а шестой и седьмой – 0,6-0,7%.

Таблица 3 Отображение переменных (спектральные каналы Landsat 7 и индексы на их основе) в семи независимых факторах.

(Факторные нагрузки полученные методом главных компонент при нормализованном *varimax* вращении. Жирным шрифтом выделенные переменные, идентифицирующие физический смысл первых трех факторов. Курсивом – вносящие некоторые дополнения.)

Типы переменных	Переменные		Главные компоненты (факторы)						
	название	описание	1	2	3	4	5	6	7
Спектральные каналы снимка	B1	голубой	-0.045	0.972	0.119	-0.053	0.081	-0.081	0.092
	B2	зеленый	0.065	0.989	0.084	-0.075	0.046	-0.037	0.021
	B3	красный	0.056	0.976	0.169	0.075	0.004	-0.016	0.085
	B4	ближний красный	0.718	<i>0.675</i>	0.070	0.083	0.065	0.087	0.010
	B5	дальний красный	0.512	<i>0.655</i>	0.526	0.077	0.068	0.140	0.028
	B6	температура	0.297	0.750	0.567	-0.015	0.021	0.088	0.101
	B7	дальний красный	0.560	0.378	0.435	-0.023	<i>0.594</i>	-0.001	-0.003
интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, типы растительности	NDVI	продукция	0.979	0.143	0.126	-0.032	0.046	-0.045	0.019
	RVI	Типы растительности	0.987	0.106	0.019	-0.072	0.029	0.038	-0.005
	DVI	Типы растительности	0.926	-0.286	-0.115	0.022	0.085	0.140	-0.092
	TSAVI	продукция	0.969	0.205	0.121	-0.004	0.053	-0.027	-0.003
	GRNDVI	хлорофилл	0.917	0.296	0.221	0.119	0.043	-0.063	0.015
	TVI	фотосинтез	0.959	0.162	0.192	-0.019	0.048	-0.102	0.043
	VI	различия биомассы	<i>-0.642</i>	<i>-0.549</i>	<i>-0.517</i>	-0.124	0.002	-0.025	0.020
	NDB4B2	хлорофилл	0.931	0.278	0.198	0.112	0.045	-0.029	0.025
Содержание влаги	LMI	в фитомассе	0.136	0.157	0.972	0.057	0.031	-0.035	-0.016
	NDWI	в фитомассе	0.262	0.187	0.938	0.053	0.038	-0.077	0.000
	NDB4B6	Поверхность	0.355	-0.117	-0.919	0.008	0.008	0.007	-0.016
	NDSNOW	снег	-0.896	-0.394	-0.160	-0.111	-0.051	-0.010	0.028
Состояние почвы	G_B	содержание железа	0.389	0.871	0.041	0.039	0.060	0.032	-0.265
	R_G	заболоченность	0.202	<i>0.670</i>	0.387	<i>0.595</i>	-0.002	0.013	0.048
	SWIR1_G	заболоченность	<i>0.691</i>	0.251	<i>0.639</i>	0.150	0.060	0.132	-0.004
	SWIR	«глинистость»	-0.766	-0.362	-0.460	-0.084	-0.022	0.246	0.001
	SWIR2_R	антропогенные объекты	-0.147	-0.852	-0.125	<i>-0.426</i>	0.051	0.030	0.207
Общая яркость	BR	яркость	0.411	0.844	0.317	0.053	0.095	0.061	0.043
	GR	зеленость	0.973	0.052	-0.008	0.108	0.009	0.173	-0.054
	W	Влажность	-0.611	-0.182	<i>-0.709</i>	-0.059	<i>-0.226</i>	-0.179	0.009
Нагрузка на факторы %%			43.5	30.4	19.9	2.5	1.7	0.9	0.6

Анализ показывает, что первая компонента определяет состояние растительного покрова: чем больше ее значение, тем ярче изображение на соответствующей карте (рис. 1). Вторая компонента содержит в себе информацию о яркости изображения в видимой части спектра и температуру поверхности (рис.2) , третья – содержание влаги в растительности (рис. 3). Эти три компоненты описывают наиболее важные функциональные характеристики ландшафтов на градиенте северная тайга-тундра в начале лета. Но компоненты второго иерархического уровня так же содержат вполне

физически осмысленную информацию. Четвертая компонента отражает с одной стороны заболоченность (положительная связь с индексом  $R_G$  – белый тон на рис. 4), а с другой наиболее «антропогенные объекты» ( $SWIR2_R$  – темные тона). Из рис. 4 очевидно следует, что фактически это компонента отражает степень дренируемости территории: все долины рек темные, а водораздельные поверхности – светлые и, соответственно, заболоченные. Пятая компонента в наибольшей степени положительно связана только с одной переменной: с отраженной дальней красной радиацией (канал 7). Чем больше отражение в этом канале, тем меньше общий запас влаги и соответственно суше. Рис. 5 демонстрирует естественное увеличение запасов влаги в долинах, в то время как водораздельные поверхности могут как сухими, так и слабо увлажненными. Шестая и седьмая компоненты вносят ничтожный вклад в отображение варьирования переменных. Соотносясь с значениями коэффициентов, можно полагать, что шестой канал отражает нелинейное дополнение к соотношению состояния растительности и запасами в ней влаги. Седьмая компонента не содержит какой-либо осмысливаемой информации, но в нем хорошо отражаются искажения связанные с дефектами работы сканера.



Рис. 1 Первый фактор - развитие растительности (максимальное развитие – белый тон) . Квадратом выделена фрагмент показанный в крупном масштабе



Рис. 2 Вторая компонента – общая яркость и температура поверхности

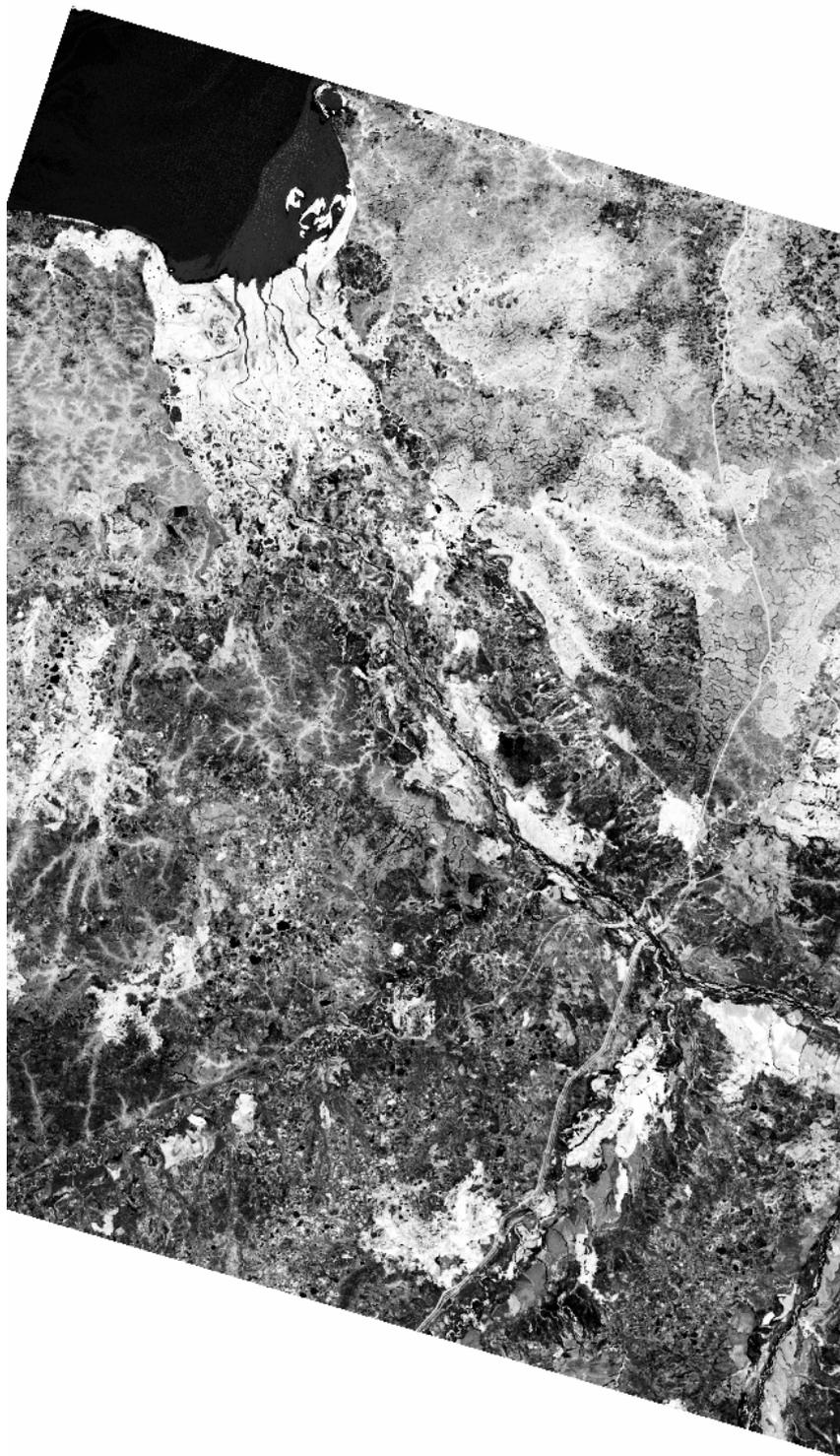


Рис. 3 Третья компонента – влажность в фитомассе  
Светлый тон – максимальная влажность



Рис. 4 Четвертая компонента – заболоченность  
Светлый тон – болота, темный тон – хороший дренаж

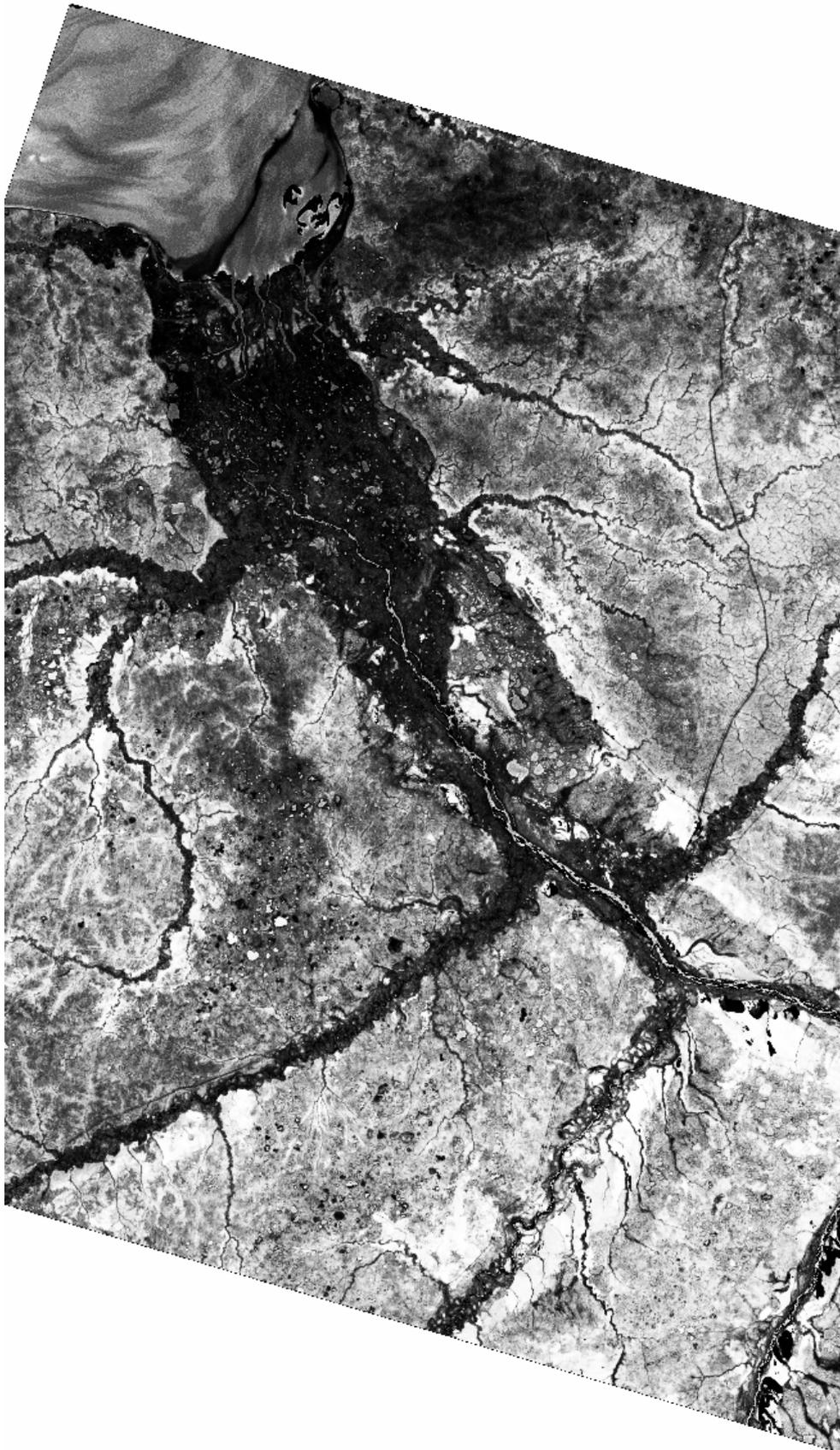


Рис. 5 Пятая компонента – общее содержание влаги  
Темный тон - максимальная влажность

Таким образом, в результате многомерного анализа получаем пространственную изменчивость физически идентифицируемых факторов, комбинации состояний которых будут порождать классы состояния ландшафтного покрова. Существенная информация о смысле выделенных классов получается и из анализа их положения на местности. Кроме того можно использовать априорную информацию о ландшафтах территории. Так на геоботанической карте 1:4000 000 .( Лавренко Е.М и В.Б. Сочавы “Геоботаническая карта СССР” в масштабе 1:4 000 000, 1956) выделяются: 1- европейские северотаежные сосновые леса, 2- западно-сибирские кустарниковые лишайниковые сосново-лиственные леса, 3- сибирские северотаежные лиственнично-еловые кедровые леса в сочетании со сфагновыми болотами, 4- предтундровые лиственные редколесья, 5 - сфагновые болота тундровой зоны, 6- кустарниковые тундры в сочетании с моховыми и лишайниковыми, а также гипово-травянистыми сфагновыми болота.

На рис. 6 (пропущен в отчете) приведены первые два уровня классификации, а в табл. 5 (пропущен в отчете) их характеристики по трем первым компонентам.

Очевидно, что на первом уровне на фоне всей территории выделяются наиболее контрастные по температуре оголенные поверхности ( в первую очередь бичевники вдоль рек) и частично населенные пункты. На втором уровне первый класс однозначно подразделяется на воду и сушу, а второй делится по величине альбедо, температуре и степени развития на бичевниках растительности. Так как воду и оголенные поверхности можно далее не дифференцировать то они исключаются из дальнейшего анализа и классификация осуществляется только для суши. На рис. 12 (табл.6) представлены результаты классификации для второго уровня без учета «воды» и оголенных поверхностей.

Из табл. 2 и рис. 7 следует, что первые два класса выделяют различные варианты тундр и болот. При этом первый класс – влажные, холодные тундры в низовьях Надыма и по долинам его правых притоков, но хорошо дренируемые, а второй класс выделяет территории с относительно редкой растительностью и низким содержанием в ней влаги, но слабо дренируемые. В этот класс наряду с тундрой входят и «нитки» газопроводов, дороги и населенные пункты. Третий и четвертый классы выделяют очевидно территории с развитием леса. Третий класс можно определить как разреженные заболоченные леса или лесотундры (низкая продукция, большое альбедо и высокие температура) , а четвертый сомкнутые, дренируемые леса с низкой температурой, скорее всего, в результате больших затрат тепла на испарение. Такие леса характерны для террас Надыма долин и террас его левых притоков. По положению этих типов ландшафтного покрова на местности можно полагать, что четвертый класс включает в себя северотаежные леса, третий – лесотундры, второй сухие тундры и первый травянисто-моховые тундры.

Рис. 7 Второй уровень классификации, без включения водных объектов и сильно нарушенных земель



Табл. 2 Характеристики четырех классов второго уровня классификации без учета «воды» и оголенных поверхностей

		Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Класс	Содержание	Состояния растительности	Альbedo, Температура	Содержание влаги в растительности	Заболоченность
1	Безлесные влажные, луговые, дренируемые	<i>-.129626</i>	<i>-.139405</i>	<i>.201768</i>	<i>.002431</i>
2	Безлесные (редколесья) , теплые сухие, слабо дренируемые	<i>-.121392</i>	<i>.274495</i>	<i>.062657</i>	<i>.007826</i>
3	Лесные низкопродуктивные, теплые, заболоченные	<i>.187095</i>	<i>.173878</i>	<i>-.097791</i>	<i>.010415</i>
4	Лесные высокопродуктивные, холодные, сухие	<i>.345128</i>	<i>-.103424</i>	<i>-.058302</i>	<i>-.010168</i>

Сокращая текст статьи покажем окончательную карту и приведем общие выводы.

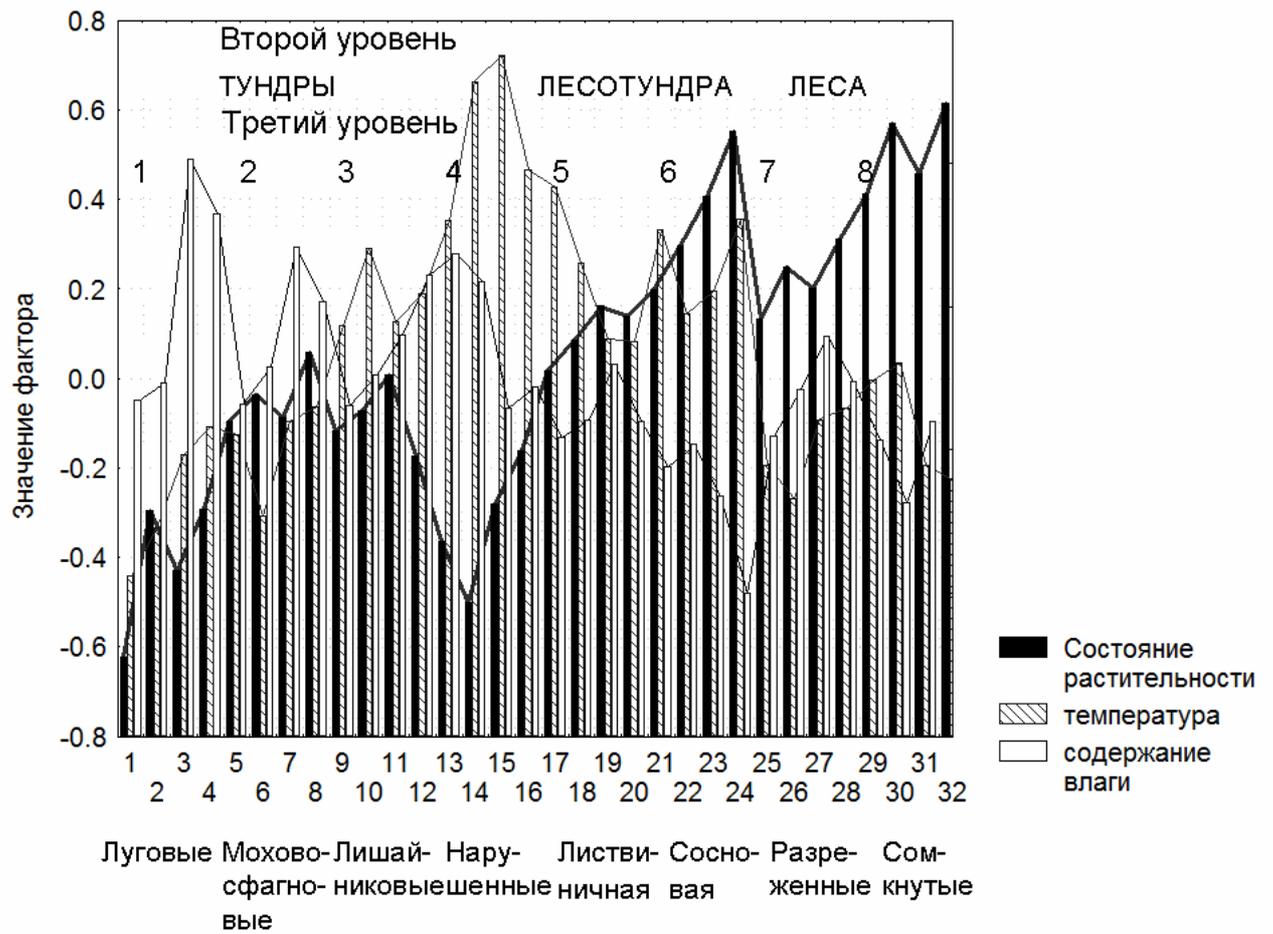
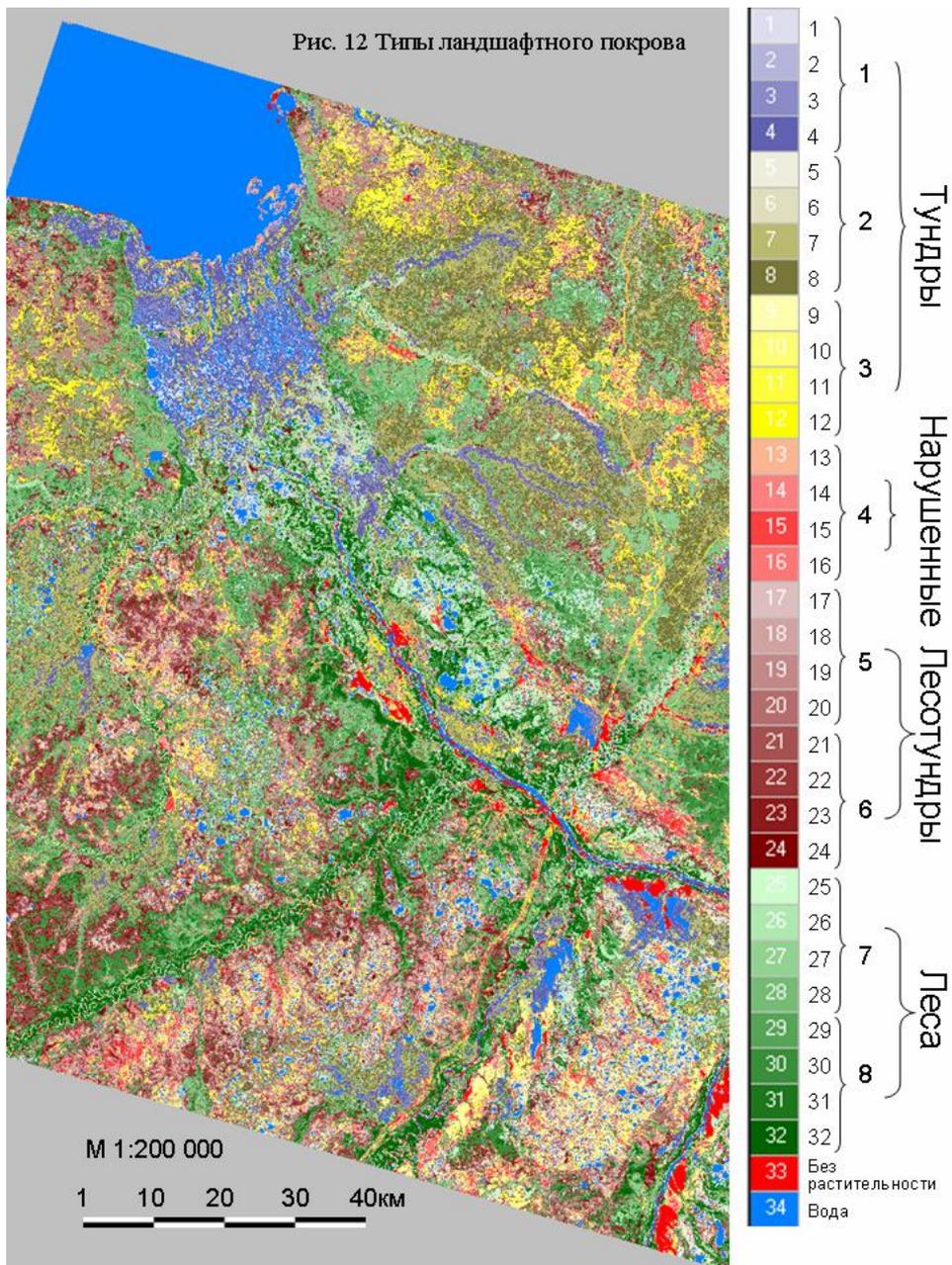


Рис. 8 Состояния трех первых факторов для различных типов ландшафтного покрова.



### Обсуждение результатов.

Продемонстрированная технология анализа мультиспектральной информации показывает возможность отображения физически интерпретируемых факторов, описывающих пространственное варьирование отображаемых в ней свойств ландшафтного покрова. При использовании сцен за несколько сезонов это отображение становится существенно богаче. Выделение состояний ландшафтного покрова на основе классификация многомерного факторного пространства позволяет построить достаточно содержательные предварительные карты. Хотя далеко не всегда можно утверждать какими именно породами образованы те или иные леса, но всегда можно оценить такие важные с хозяйственной точки зрения их свойства как запас фитомассы и продуктивность.

Вообще получаемая на основе многомерного анализа информация о территории может служить основой для широкого круга инженерно-технических решений. Очевидно, что информация о заболоченности и дренаже весьма полезна при проектировании различных инженерно-технических сооружений. Информация о растительном покрове позволяет определить биопродукционный потенциал территории и состояние лесных ресурсов. Пространственная структура ландшафтного покрова с учетом пространственного разнообразия и уникальности его состояний способствует обоснованию сети охраняемых территорий. Наконец с учетом значения факторов в каждой точке пространства можно выделить ведущий фактор, определяющий конкретное состояние и устойчивость ландшафта к произвольным типам внешнего воздействия. Но, конечно, самое главное, что такой анализ позволяет построить оптимальный план обследования территории для описания реального состояния ландшафтного покрова в конкретных точках. На этой основе, используя алгоритмы классификации по обучающей выборке, можно построить карты состояния ландшафтного покрова и его отдельных компонентов в семантической форме наиболее удобной для принятия решений.