

УДК 911.52, 911.9, 528.854

УТОЧНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2011 г. А.Н. Кренке-мл.*
М.Ю. Пузаченко*, Ю.Г. Пузаченко**

*Географический ф-т, МГУ,
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова, РАН*

Поступила в редакцию 17.12.2010 г.

В представленной работе на примере анализа фрагмента карты растительности СССР М. 1 : 4000 000 демонстрируется решение задачи корректировки содержания ее выделов на основе современной дистанционной информации спутника Landsat. Рассмотрено применение дискриминантного анализа. Показано, что удастся не только существенно уточнить границы, но выделить и переходные состояния и свойства растительного покрова, которые отсутствовали на карте, но содержатся в спектрах отраженной солнечной радиации.

Во второй половине XX в. получило широкое развитие специальное картографирование компонентов ландшафта. Специальные карты вобрали в себя все достижения теории и практики географических наук. Так К.А. Салищев [13], обсуждая проблемы комплексного и тематического картографирования, особо выделил составление государственных карт в М 1 : 1000 000 как составляющих комплексного картографирования и актуальность разработки мировых и региональных атласов [14]. А.Г. Исаченко [4] обобщил существовавший опыт картографирования. Эти и другие работы обосновали представление о карте как модели географических явлений и фактически тематические карты стали необходимой составляющей геоботанических, почвенных и физико-географических исследований. В результате в России выполнен огромный объем по составлению карт различного масштаба [21]. Тематические карты содержат в себе большой массив знаний, накопленных в науке. Необходимо, чтобы эти знания могли активно влиять на ее дальнейшее развитие. Для этого тематические карты необходимо сохранить в современной векторизированной форме и сделать доступными при организации новых исследований и практическом использовании. Вместе с тем многие великолепные картографические продукты, такие, например, как “Геоботанической карте СССР” М. 1 : 4 000 000 (М.; Л., 1956 под ред. Лавренко Е.М., Сочава В.Б.) стали библиографической

редкостью. При всех достоинствах тематического и комплексного картографирования оно всегда сталкивалось с неопределенностью границ своих объектов, с необходимостью интерполяции и экстраполяции их состояний, непосредственно не наблюдаемых в природе и на аэрофотоснимках. Неопределенность границ связана с фундаментальной проблемой соотношения дискретности и непрерывности в организации географического пространства [1].

Эта проблема особенно широко дискуссировалась в геоботанике [8, 20, 25]. В связи с этой неопределенностью тематические карты, составленные на теоретико-методологических основаниях Российской и Европейской географии, вызывают недоумение представителей американской школы. Так, Стоун и Шлезиринг [26], взяв на себя труд оцифровки карты растительности СССР 1990 г. М 1 : 4000 000, дали следующий комментарий, содержащий оценку самого картографического продукта и описание возникших проблем: “... Эти карты в некотором роде больше “искусство”, чем наука, и их история полностью нам неизвестна. Наш опыт с другими российскими и советскими картами принуждает нас быть очень осторожными в их использовании, особенно при попытках развить на их основе численные или количественные методы оценки леса или других типов ландшафтного покрова....., традиция российской геоботаники относится к местному, а не к государственному или континентальному

масштабу. ... Мы не знаем ни о какой оценке точности, сделанной для этой карты.”

Также авторы отмечают, что до недавнего времени были доступны только карты 1:500 000 или меньшего масштаба, так что полевая проверка их содержания была затруднена. На рассматриваемой карте, как в почти всех картографических продуктах того времени, полигоны – дискретные объекты, категории ландшафтного покрова не переходят друг в друга. В природе контуры, занятые разными типами растительности имеют тенденцию постепенно переходить от одного к другому. Этот постепенный переход потерян в картографических продуктах, которые делят типы ландшафтного покрова линией.

Современные карты, которые созданы на основе спутниковых данных, и вообще растровые продукты, в которых не выделяется дискретных полигонов, в некотором смысле, могут в большей степени отражать реальность.

Мнение американских специалистов [26], очевидно не знающих теории и методов составления тематических карт, ставит под сомнение всю огромную работу по изучению компонентов ландшафта, в том числе и работу по составлению карты растительности Европы [22], подменяя их дистанционной информацией. Вместе с тем в их замечаниях есть и безусловная правда. Тематические карты, хотя и составляются на основе реальных полевых данных, приводимых в региональных сводках, в силу неполной наблюдаемости объекта отражают как формальное, так и неформальное знание и в этом смысле близки к искусству. Границы действительно часто неопределенны, в результате чего карты разных авторов для одной и той же территории могут различаться в существенных деталях. Вместе с тем каждый из российских исследователей неоднократно при планировании и проведении полевых работ опирался на эти карты, и они, с учетом масштаба, редко не отвечали реальности. Конечно, их не украшает искаженная географическая проекция и основа, но и эти искажения в целом преодолимы.

Принимая во внимание эти реальные проблемы авторами были предприняты экспериментальные работы по верификации и коррекции на основе дистанционной информации и трехмерных моделей рельефа листа почвенной карты М. 1 : 1000 000 [24], ландшафтной карты Кавказа [11], указанной выше карты растительности СССР [16].

В настоящей статье разработанная технология валидации и коррекции демонстрируется для фрагмента “Карты растительности СССР” М

1 : 4000 000 оцифрованной Стоун и Шлезинг [26]. Цель статьи – продемонстрировать технологию коррекции и широкие возможности использования тематических скорректированных карт не только в системе принятия решений, но и для анализа генетической основы формирования пространственной структуры объекта картографирования. Идея, положенная в основу верификации и коррекции карт, сводится к следующему:

1. Мультиспектральная отраженная радиация, измеряемая со спутника, несет в себе информацию о фундаментальных процессах преобразования солнечной энергии земной поверхностью, определяемых составом растительности, почвенно-геохимическими условиями и увлажнением в конкретной территориальной единице измерения (пиксель).

2. Свойства растительности и почв – есть во многом функция формы земной поверхности количественно описываемых через трехмерную модель рельефа.

3. Если тематическая карта адекватно надежно отражает реальность, то она должна статистически значимо воспроизводиться через мультиспектральную информацию и объявляемые дистанционными методами характеристики рельефа.

4. Если воспроизводимость доказана, то можно на основе полученной зависимости обосновать формальный алгоритм интерполяции состояний объекта картографирования на всю территорию, охваченную картой и соответственно скорректировать границы выделов.

Материал и методика. В качестве объектов коррекции выбран фрагмент Карты растительности СССР для высших учебных заведений М. 1 : 4000000, охватывающий западную часть Тверской области общей площадью 22 000 км² с координатами: верхний левый угол – 57° с.ш. 31° в.д; нижний правый угол; 56° с.ш. 34.4° в.д. Использована оцифровка, проведенная в лаборатории Оак Ридж [26]. Выбор для демонстрации именно этой территории определяется многолетними стационарными и экспедиционными исследованиями, осуществленными авторами здесь на базе Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника.

В основу верификации положены сцены спутника Landsat: Landsat MSS 1975–1979 гг. (май и сентябрь), Landsat TM 1988–1990 гг. (май), Landsat ETM 2000–2002 гг. (апрель–октябрь) трехканальные мозаики GeoCoverTM и GeoCoverETM с исходным разрешением 30 м на местности.. Сбор сцен для всей территории для каждого срока

осуществлен с помощью программы ERDAS IMAGINE 8. GeoCover™ собран из безоблачных сцен за 1990+/-3 года, а GeoCover™ за 2000+/-3 года [23]. В GeoCover из семи каналов Landsat выбраны три канала: канал 7 – средний инфракрасный, канал 4 – ближний инфракрасный, канал, 2 – видимый зеленый. Для рассматриваемой территории мозаика GeoCover™ соответствует весенним снимкам 1988–1990 г., а GeoCover™ сентября 2000–2002 г. Каждый канал содержит определенную информацию о физическом процессе. Первый канал (синий) наименее информативен, так как весьма чувствителен к аэрозолям и содержанию воды в атмосфере. Второй канал (зеленый) хорошо отражает цвет самой растительности: наибольшее отражение – в луговых сообществах и минимальное – в сосновом лесу. Третий канал (красный) максимально поглощает радиацию при высокой активности фотосинтетических процессов. Четвертый канал (ближний инфракрасный) дает максимум отражения при высоком развитии клеточных структур листьев, соответствующем максимуму фотосинтеза. Разность между четвертым и третьим каналом достаточно тесно коррелирует с биологической продуктивностью. Пятый канал (средний инфракрасный 1) отражает содержание влаги в растительном покрове: чем больше влаги, тем меньше отражение. Седьмой канал (средний инфракрасный 2) – общее содержание влаги в экосистеме. Наконец, шестой канал Landsat измеряет тепловой поток от поверхности суши.

В соответствие с масштабом карты растительности формально каждому пикселю с линейными размерами 0.1 мм на карте должен соответствовать квадрат с линейными размерами 400 м на местности. Однако очевидно, что нагрузка исходной карты не отвечает этому масштабу, так как ширина линий границы больше 0.1 мм. Следовательно, одному пикселю карты оправдано поставить в соответствие квадрат с линейными размерами 1 км ($M : 10\ 000\ 000$). Дистанционная информация агрегирована до этого масштаба и объединена в растровом формате в единую базу данных: зависимая переменная – состояния растительности, независимые переменные спектральные каналы Landsat.

Для проверки гипотезы связи дискретной зависимой переменной от независимых, оценки меры этой связи и последующей интерполяции зависимой переменной по независимым используются различные статистические методы [3]: дискриминантный анализ, методы, основывающиеся на размытых множествах, методы с оценкой наибольшего правдоподобия, нейронные сети др.

Наиболее доступным и информативным методом является дискриминантный анализ. Теория и практика применения дискриминантного анализа многократно и подробно освещена в литературе [2, 5, 9, 19], что позволяет остановиться на рассмотрении его составляющих, важных для интерпретации результатов.

В ходе дискриминантного анализа ищутся такие нагрузки на независимые переменные, при которых минимальна дисперсия внутри классов или максимально расстояние между центрами их тяжести в пространстве переменных. В результате дискретные классы отображаются в непрерывные ортогональные оси. Число осей не может превышать число независимых переменных и/или числа классов без одного ($n-1$). Отнесение каждой точки к тому или иному классу осуществляется по частным регрессионным функциям от этих осей с допущением нормальности распределения дистанций внутри каждого класса. В результате для каждой точки (пикселя) на карте, получаем вероятность отнесения ее к каждому классу. Точка считается принадлежащей к тому классу, для которого вероятность принадлежности максимальная.

Результаты классификации существенно зависят от того, как задана норма центроидов для дискретных состояний, т.е. с какой априорной вероятностью включены классы в анализ. Обычно рассматриваются два варианта: 1) классы заданы с вероятностью соответствующей выборке, 2) классы заданы с равными вероятностями. Если классы хорошо различаются в пространстве независимых переменных, то различия между этими двумя вариантами обычно не велики. Однако для реальных явлений природы и тем более для специальных карт, где неопределенность априори велика, эти различия могут быть весьма значительными. Обычно первая модель относит большое число точек к доминирующему классу, а вторая, напротив, увеличивает долю редких. Непосредственно в рамках дискриминантного анализа устранить эту неопределенность невозможно. Удовлетворительный результат дает выделение дискретных состояний через процедуру дихотомической классификации методом К-средних по векторам вероятности принадлежности одновременно для двух вариантов или по ортогональным осям дискриминантного анализа [6]. Здесь уже не действует гипотеза нормальности распределения, и дискретные образы получаются более реалистичными. Определить их соответствие исходным состояниям можно, используя средние значения для класса векторов вероятностей, и на этой основе построить уточненную версию карты. При

этом в большинстве случаев можно получить состояния, отсутствующие на исходной карте, но имеющие очевидный физический смысл. Средства дискриминантного анализа дают информацию, позволяющую фактически перейти к аналитическим картам. В рамках дискриминантного анализа по F –критерию сразу же можно определить вклад независимых переменных в различении заданных классов. Они имеют физический смысл и могут трактоваться как факторы дифференциации. Значение каждой оси дискриминантного анализа оценивается по собственному значению, канонической корреляции, а статистическая значимость по критерию χ^2 , что позволяет определить размерность пространства и создаваемое им разнообразие. Каждая ось дискриминантного анализа дает отображение определенного типа связей объекта с внешними переменными на рассматриваемой территории. Так как оси независимы, то их разнообразие может быть определено по модели нормального распределения $H_{nit} = \sum 0.5 \ln(\sigma_i^2 / 2\pi e)$, где σ_i^2 – собственное значение оси в дискриминантном анализе плюс единица есть дисперсия оси i . Разнообразие, определяемое дистанционной информацией, есть число возможных дискретных состояний: $K = \exp(H_{nit})$. Каждая дискриминантная ось однозначно описывается от независимых переменных. Таким образом, на основе специальной карты получаем возможность построить статистическую модель рассматриваемого явления.

Результаты анализа. На рис. 1а показана исходная геоботаническая карта восстановленной растительности с пятью типами состояний. На

ней, в интерпретации авторов оцифровки [23], вся не болотная растительность отнесена к (темнохвойным, светлохвойным, мелколиственным лесам и редколесьям, бореальным лесам и редколесьям – южной тайги) со следующими разностями:

1. Еловые, елово-пихтовые, пихтово-еловые леса с травяно-кустарничковым и мозаичным зеленомошным покровом. (*Picea abies*, *P. abies* x *P. obovata* с участием неморальных элементов). Индекс на исходной карте – 30а.

2. Сосновые и лиственнично-сосновые леса, травянисто-зеленомошный покров с кустарничково-лишайниково-зеленомошным покровом (*Pinus sylvestris* w/ *Picea abies*, *P. abies* x *P. obovata* с участием южно бореальных видов). Индекс – 32а.

3. Темнохвойные с примесью широколиственных (подлесок из неморальных видов) и темнохвойно-широколиственные леса (*Picea abies*, *P. abies* x *P. obovata*, *Quercus robur*, *Tilia cordata*). Индекс – 34б.

Кроме того на карте представлены болота:

4. Сфагновые кочкарниково-грядовые и грядово-мочажинные с *Chamaedaphne calyculata*, *Sphagnum majus*, *S. fuscum*. Индекс – 115б.

Озера Пено и Волго и др. выделены на карте как вода (5-й контур).

Далее для краткости будем использовать, следующие сокращения: 1 – еловые леса, 2 – сосновые леса, 3 – смешанные леса, 4 – болота, 5 – вода.

В табл. 1 приведена общая оценка качества выделения заданных состояний по двум моделям. Можно констатировать, что различия между ними

Таблица 1. Качество распознавания состояний растительности по каналам Landsat и GeoCover

Модель	Состояния	Состояния				
		Еловые леса	Сосновые леса	Смешанные леса	Болота	Вода
По выборке	1	69.3	6.6	18.8	4.5	0.8
	2	14.9	51.9	28.3	2.6	2.3
	3	13.7	7.2	77.6	0.4	1.0
	4	32.3	7.2	22.3	37.6	0.6
	5	9.5	15.8	24.2	1.6	48.9
	Всего	30.9	15.1	48.6	3.2	2.2
Равно-вероятностно	1	69.1	11.5	11.8	6.4	1.3
	2	11.6	70.7	9.9	3.9	3.9
	3	17.9	14.3	64.9	1.0	1.9
	4	28.0	11.5	15.4	44.2	0.9
	5	8.6	18.3	14.5	2.1	56.5
	Всего	32.0	23.5	36.8	4.4	3.2
Исходно	Всего	29.6	17.8	47.4	3.0	2.2

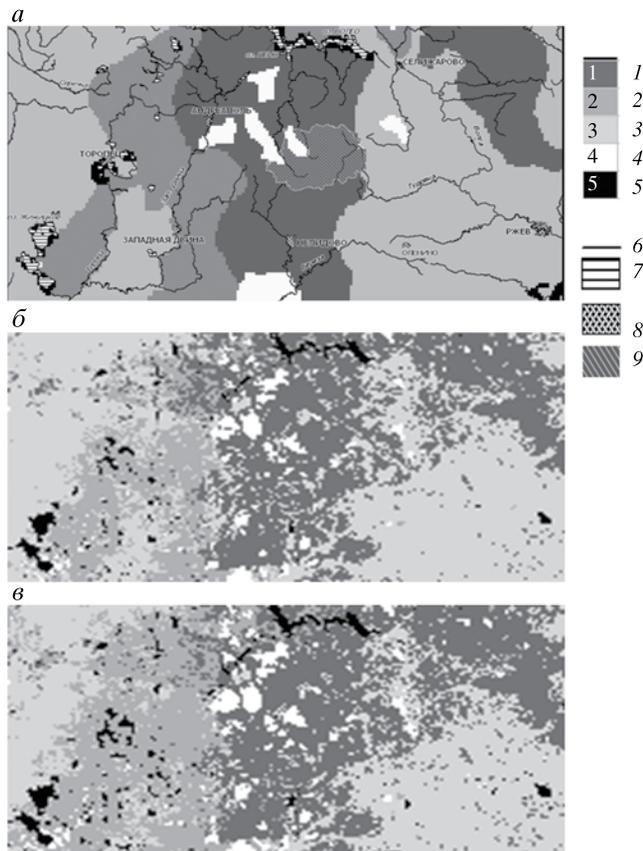


Рис. 1. Результаты уточнения карты восстановленной растительности дискриминантным анализом. *а)* исходная карта М 1:1000000; *корректированные карты:* *б)* по доли участия состояний растительности в выборке, *в)* по равновероятным состояниям растительности:

1 – еловые леса, 2 – сосновые леса, 3 – смешанные леса, 4 – болота, 5 – вода. Общие обозначения: 6 – реки, 7 – озера, 8 – города, 9 – Центрально-лесной заповедник с охранной зоной.

не велики, но модель с равновероятно заданными состояниями предсказывает несколько большую долю болот и водоемов. В целом лучше всего распознается три состояния лесов, хуже всего болота и вода. Вместе с тем доля болот по обеим моделям больше, чем на исходной карте, что определяется отнесением к ним территорий с лесами. В целом же, несмотря на то, что измерениям мультиспек-

трального отражения ставится в соответствие мелкомасштабная карта восстановленной растительности, между ними устанавливается вполне достоверное соответствие. По рис. 1б, в хорошо виден эффект коррекции исходного изображения. Вместо очень простых сплошных контуров появилась их территориальная мозаика, отражающая постепенность перехода из одного состояния в другое. Появились так же мелкие болота и водоемы, отсутствующие на исходной карте. Из табл. 2 следует, что все оси дискриминантного анализа имеют очень высокий уровень статистической значимости (критерий χ^2) и высокие уровни корреляции с исходной картой. Их совместное разнообразие 6.21 nit и соответственно на карте в пределе можно выделить $\exp(6.21) = 488$ состояний.

Средняя вероятность распознавания состояний растительности составляет 0.7, а минимальная < 0.46 отмечается всего на 8% территории. Практически однозначно распознаются водоемы, болота и сосновые леса зандровых равнин Западной Двины. На рис. 2 показана вероятность отнесения каждого пикселя к одному из выделенных состояний. С вероятностью близкой к единице еловые леса распознаются на юге Валдайской возвышенности (рис. 2г), восточнее г. Селижарово (рис. 1а), на возвышенных моренных грядах в районе Центрально-лесного заповедника, и южнее р. Березы. В треугольнике Селижарово – р. Тудовка на относительно пониженной поверхности правобережья р. Волги еловые и смешанные леса образуют территориальную мозаику с вероятностями их распознавания от нуля до единицы. В северо-западной части рассматриваемой территории севернее г. Андреаполя и р. Сережа еловые леса сочетаются с сосновыми.

Сосновые леса с вероятностью близкой к единице распознаются по низменностям с зандровыми равнинами вдоль р. Западная Двина, р. Торопы и оз. Пено. Фрагментарно с высокой вероятностью они выделяются по краям болотных массивов в межрядовых понижениях на Валдайской возвышенности. В целом же с вероятностью больше нуля они характерны для низменностей.

Таблица 2. Качество модели дискриминантного анализа

Оси	Дисперсия	Собственное значение (%)	Каноническая корреляция	χ^2	Число степеней свободы	Уровень значимости
1	1.5609	43.5	0.600	23948.56	92	0.00
2	1.3783	29.4	0.525	14135.63	66	0.00
3	1.1865	14.5	0.406	7063.18	42	0.00
4	1.1609	12.5	0.373	3291.36	20	0.00

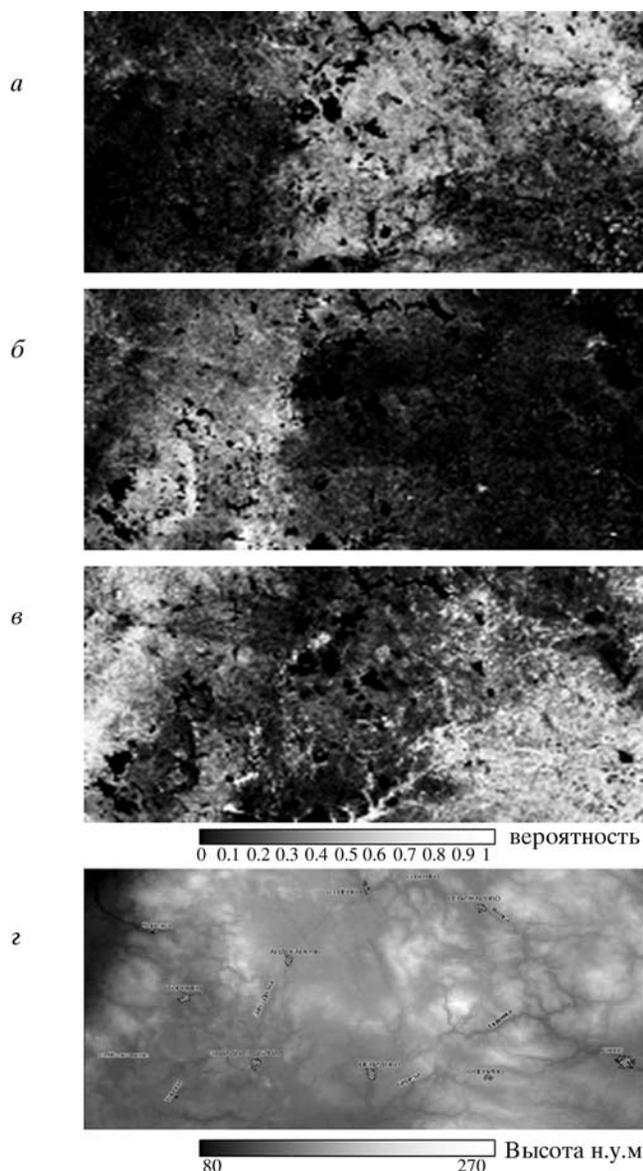


Рис. 2. Вероятность выявления состояний растительности: а) еловые леса, б) сосновые леса, в) смешанные леса, г) рельеф (высота над уровнем моря).

Смешанные лиственные леса занимают два разорванных ареала: западный, связанный с Ловатской низменностью и западным склоном Валдайской возвышенности и юго-восточный – южнее р. Тудовка в Оленском и Ржевском районах. С вероятностью близкой к единице эти леса распознаются на наиболее возвышенных участках западного сектора, по долинам рек и камовым возвышенностям на юго-западе. На остальной территории они образуют мозаику с сосновыми и еловыми лесами. Таким образом, очевидно, что дистанционная информация раскрывает естественное, обусловленное структурой ландшафта

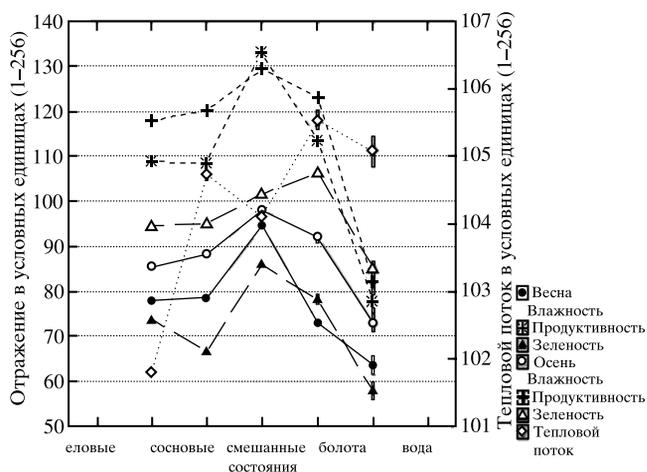


Рис. 3. Спектральные яркости состояний растительности в трех каналах GeoCover и тепловом канале Landsat.

пространственное варьирование растительного покрова.

В соответствии со статистическим критерием Фишера все переменные дистанционной информации статистически значимо участвуют в идентификации растительных сообществ (состояний). С *F*-критерием больше 100 состояния растительности различаются каналами GeoCover тепловым каналом Landsat в сентябре. На их основе можно показать специфичность преобразования солнечной радиации растительностью разных фитоценозов, определяющую их различие в дискриминантном анализе. В общем случае, чем больше значение переменной (рис. 3), тем больше отражение солнечной радиации. Соответственно вода в наибольшей степени поглощает солнечную энергию во всех спектральных каналах. Все четыре выявленных типа фитоценозов хорошо различаются по содержанию влаги. Наименьшее содержание влаги как весной, так и осенью характерно для лесов с большим участием лиственных пород. Еловые леса, напротив, характеризуются наибольшим содержанием влаги, а сосновые весной содержат практически столько же влаги, как и еловые, а осенью заметно меньше. Содержание влаги в болотах по спектральным измерениям наиболее неустойчиво и существенно зависит от конкретных погодных условий [15]. В данном случае весной болото содержало очень много влаги и по отражению в этом канале приближалось к открытой воде, а осенью, напротив, было суше, чем хвойные леса.

Биологическая продуктивность индицируется четвертым каналом дистанционной информации.

Таблица 3. Связь осей дискриминантного анализа с вероятностями принадлежности пикселя к состояниям растительности

Мера	Вероятность состояния	Ось 1	Ось 2	Ось 3	Ось 4
Корреляция Спирмена	Еловые леса	-0.59	0.54	-0.24	-0.55
	Сосновые леса	-0.08	-0.78	0.54	-0.20
	Смешанные леса	0.94	0.18	-0.13	0.25
	Болота	-0.41	0.37	-0.09	0.44
	Вода	-0.14	-0.53	-0.58	0.14
Критерий Фишера	Еловые леса	1204	1073	74	701
	Сосновые леса	45	2710	762	117
	Смешанные леса	12691	158	18	347
	Болота	373	59	91	3408
	Вода	56	612	1408	15

При этом, чем больше отражение, тем больше продуктивность. Как весной, так и ранней осенью она максимальна в смешанных лесах. Этот признак, как и запасы влаги достоверно отличает их от хвойных лесов. Продуктивность еловых и сосновых лесов весной практически не различается, но осенью у сосновых лесов она выше. Продуктивность болот и весной и осенью выше, чем у хвойных лесов, но ниже чем у смешанных. Отражение весной в зеленом канале позволяет надежно различать сосновые и еловые леса: у сосновых лесов оно существенно меньше. В этом канале смешанные леса в период вегетации отражают больше, чем хвойные. Отражение в этом канале от поверхности болот, так же как и в других существенно зависит от погодных условий. В данном случае осенью оно максимально.

Наконец, осенью тепловой поток минимален в еловых лесах и весьма значителен в сосновых. Сосновые леса “теплее” смешанных и еловых лесов. Вместе с тем болота и водная поверхность осенью излучают больше тепла, чем леса. Этот эффект определяется, тем, что спутник пролетает над рассматриваемой территорией в 10–11 ч утра, а теплоемкость озер и болот выше теплоемкости лесов. Таким образом, специфические комбинации отражения солнечной радиации в разных каналах, за разные сезоны года у различных состояний растительности и в целом земной поверхности обеспечивают их разделение в дискриминантном анализе.

Оси дискриминантного анализа интегрируют в себя эти сложные комбинаторные соотношения, представляя их как линейно независимые отображения многомерного пространства переменных дистанционной информации в отношении растительного покрова.

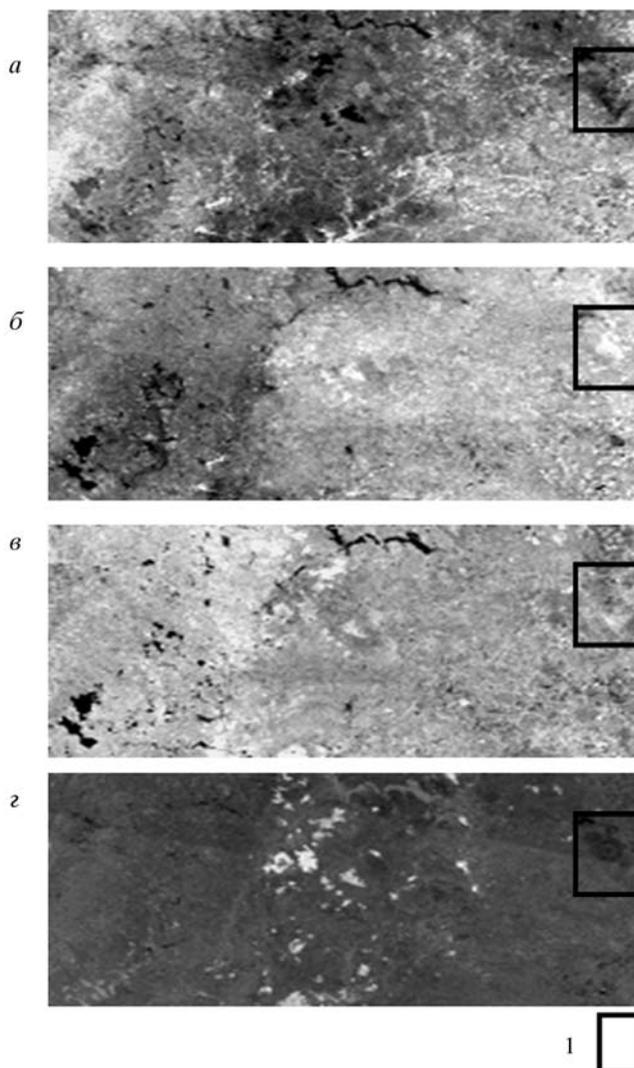


Рис. 4. Четыре оси дискриминантного анализа: *а* – ось 1, *б* – ось 2, *в* – ось 3, *з* – ось 4, 1 – область искажений связанная с облаком в GeoCover за 2000 г.

На рис. 4 показаны оси дискриминантного анализа. Формально их можно трактовать как координаты пространства состояний растительности. Из материалов табл. 3 следует, что первая ось статически значимо положительно связана со смешанными лесами и отрицательно с еловыми. Так как эти леса однозначно различаются по содержанию влаги, то эта ось отражает варьирование в пространстве этой физической переменной: чем ярче, тем меньше содержание влаги (рис. 4а). Вторая ось положительно определяет болота, еловые леса и отрицательно сосновые. В целом, чем темнее тон, тем больше вероятность сосновых лесов и чем светлее, тем больше вероятность болот. Исходя из материалов рис. 3 эту ось можно ассоциировать с отражением в зеленом канале весной, т.е. интенсивностью вегетации. По этой оси долина Западной Двины четко разделяется на две части: западную – более темную (меньше зеленость) и восточную более светлую. Третий канал в наибольшей степени связан с водой. Озера имеют наиболее темный тон, а светлому тону соответствуют сухие территории и, в частности, сосновые леса. Эта ось также разделяет территорию на те же две части: западную более сухую и восточную – более влажную. Эти различия хорошо согласуются с спецификой почвообразующих пород [10]. В западной части они имеют более легкий механический состав. Четвертая ось однозначно связана с болотами. Ее можно трактовать как отображение степени застойного увлажнения или заболачивания. Чем светлее тон, тем в большей степени территория подвержена заболачиванию. На этой оси, имеющей наименьший вес в описании растительности проявляются дефекты соединения различных сцен и вклад облака, присутствующего на GeoCover 2000. Распространение елового леса определяется почти в равной степени тремя осями, соснового – двумя, а смешанного – одной.

Оси, выделяемые при дискриминантном анализе, содержат существенно больше информации о растительности, чем исходная карта. Применяя к осям дихотомическую классификацию [6] можно выделить не только состояния, заданные в исходной карте, но и переходные, отражающие, как территориальную мозаику, так и сочетание пород в одном насаждении. Детальность классификации определяется желанием исследователя и реальным разнообразием растительного покрова. Последнее может быть количественно оценено, через энтропию для каждого уровня классификации [12]. При максимальном разнообразии энтропия, измеренная по двоичному основанию, равна уровню двоичной классификации (1, 2, 3, ..., n), а

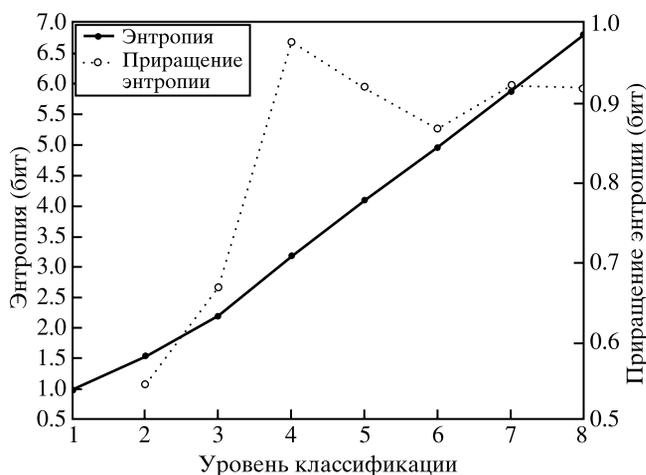


Рис. 5. Оценка разнообразия растительного покрова для уровней дихотомической классификации по четырем осям дискриминантного анализа.

ее приращение равно 1 бит. Реальная оценка энтропии для каждого уровня и ее приращение – есть меры территориального разнообразия объекта. Если производная постоянна, то территориальная система равновесна. Уровни, на которых производная уменьшается, указывают на область нарушения равновесности. На первом уровне классификации энтропия очень близка к максимально возможной (0.99 бит), но приращение ее ко второму уровню очень мало. Такое маленькое приращение определяется тем, что в юго-восточном углу территории имеются свежие карьеры без растительности, образующие уникальный класс из трех пикселей. Максимально возможное разнообразие фиксируется для четвертого уровня с производной близкой к единице. На более высоких уровнях за счет появления далее неделимых классов оно вновь снижается. Таким образом, оптимальным уровнем для представления разнообразия растительного покрова можно принять четвертый.

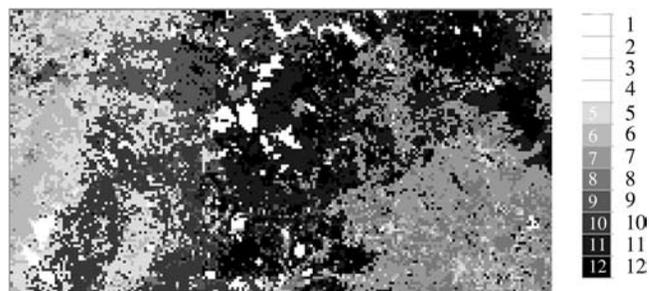
В табл. 4 приведены распределения объединения вероятностей по двум моделям состояний растительного покрова для каждого класса, которые и описывают их содержание. Для еловых и сосновых лесов существует классы, в которых они абсолютно доминируют, дополняемые двумя переходными сосной с елью и ели со смешанными лесами. Практически чисто лиственные леса соответствуют двум классам один, из которых распространен в основном на западе, а другой на востоке (рис. 6). Первый образует переходный класс с сосной, а второй с елью. Три последних класса, относимые к смешанным лесам в действительности являются землями, лишенными растительности. В исходных данных нет сведений о

Таблица 4. Распределения вероятностей состояний восстановленной растительности для состояний, выделенных на основе классификации по осям дискриминантного анализа

Номер состояния	Средняя вероятность					Содержание
	Еловые леса	Сосновые леса	Смешанные леса	Болота	Вода	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	Вода
2	0.02	0.03	0.02	0.00	0.92	Береговая линия
3	0.33	0.46	0.20	0.01	0.00	Сосновые и еловые леса
4	0.13	0.59	0.17	0.05	0.05	Сосновые леса
5	0.56	0.09	0.28	0.06	0.01	Еловые и смешанные леса
6	0.65	0.14	0.19	0.02	0.00	Еловые леса
7	0.07	0.02	0.02	0.89	0.00	Окраины болот
8	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Болота
9	0.10	0.38	0.50	0.01	0.01	Смешанные и сосновые леса
10	0.04	0.16	0.78	0.01	0.01	Смешанные (западные) леса
11	0.25	0.07	0.67	0.01	0.00	Смешанные леса с елью
12	0.14	0.04	0.76	0.03	0.03	Смешанные (восточные леса)
13	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	Карьеры с грунтом, лишенным растительности
14	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	
15	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	

распространении безлесных территорий, имеющих существенно большее отражение солнечной радиации, чем лесная растительность и болота. По исходным данным отражение от смешанных лесов в целом максимальное, что и определяет отнесение реальных безлесных территорий к классу смешанных лесов. В общем случае карта восстановленной растительности может быть дополнена, например, информацией о характеристике безлесных территорий с топографических карт, что уменьшило бы исходную площадь, занятую смешанными лесами.

На рис. 6 представлены данные о распространении лесной растительности, полученные на основе классификации. Для лучшего отображения распространения двух вариантов лиственных лесов нумерация в легенде изменена относительно нумерации классов в табл. 4. Выделение двух вариантов смешанных лесов вне зависимости от исходных данных полностью соответствуют реальности. Реальные полевые данные показывают, что развивающиеся в относительно мягком климате западные смешанные леса имеют более богатый состав неморальных видов и в них существенно больше роль дуба и других широколиственных пород. Восточные леса, связанные с более континентальным климатом, в основном мелколиственные. Собственно сосновые леса связаны в основном с зандровыми, а переходные с флювиогляциальными отложениями. Типичные

**Рис. 6.**

южно-таежные еловые леса занимают наиболее высокие части возвышенностей и моренных гряд, а переходные различные варианты межрядовых понижений. В данном сообщении ограничимся лишь констатацией этих наиболее очевидных фактов. Однако существуют возможности детального анализа связи распространения различных состояний растительности со свойствами рельефа и среднемасштабным отображением климатических переменных, представленных в базе данных WorldClim [27].

Обсуждение результатов. Представленный материал показывает широкие возможности уточнения тематических карт на основе дистанционной информации. Обобщение информации

исходной карты, взятой для анализа, и дистанционной информации, позволяет получить три взаимодополняющие отображения: собственно скорректированные карты, вектора вероятности принадлежности пикселя к каждому классу, отображение объекта в независимых координатах (осях) многомерного пространства, которые и позволяют построить наиболее информативную версию уточненной карты. Задача разрешима во всех случаях, если в исходной карте нет принципиальных искажений нарушающих естественные соотношения географических явлений. Такие искажения, конечно, существуют. Для того чтобы снизить их влияние, желательно осуществлять коррекцию для большой территории, ослабляя вклад локальных искажений. В общем, предпочтительно осуществлять коррекцию для отдельно взятых сцен Landsat, охватывающих квадрат со стороной 180 км. Преимуществом такого подхода является исключение объединения сцен с соседних орбит, часто вносящих заметные искажения, выявляемые в анализе. Влияние рельефа, механического состава и химии почв на спектральное отражение солнечной радиации, столь высоко, что многие их свойства воспроизводимы по обучающей выборке непосредственно через дистанционную информацию. Это создает возможность верифицировать не только карты растительности, но и почвенные и геоморфологические карты. Если результат оказывается неудовлетворительным, то можно использовать совместно с дистанционной информацией и различные морфометрические характеристики рельефа: уклоны, кривизны, лапласиан, освещенность для различных иерархических уровней рельефа [7]. Этот прием сходен с подходом И.Н. Степанова [17, 18] с той лишь разницей, что он постулирует, а не количественно исследует набор определенных связей картографируемого объекта с рельефом.

Верификация тематических карт возможна и для обширных регионов, например, для всей территории бывшего СССР. Имеющийся опыт показывает, что для решения этой задачи наиболее эффективно использовать GeoCover и продукты SPOT Vegetation с разрешением 1 км² на местности.

Возможна также коррекция карт с последовательным увеличением масштаба. Для этого сначала осуществляется операция показанная выше, а затем полученная скорректированная растровая карта переводится в необходимый, более крупный масштаб и используется как обучающая выборка. Детализация происходит за счет более тонких территориальных структур, отображаемых дистанционной информацией более крупного масштаба.

Фактически в рамках решения задачи коррективки карт строится многомерное пространство картографированного явления, которое обычно имеет вполне определенный физический смысл. Анализ связи координат этого пространства с климатом, рельефом и координатами других географических явлений позволяет на новом количественном уровне перейти к аналитическим и комплексным картам общенаучного и специального назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 287 с.
2. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С. и др. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.,.
3. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Свейна Ф. и Дейвис Ш. Пер. с англ. М.: Недра, 1983. 415 с.
4. Исаченко А.Г. Физико-географическое картирование. Ч. III. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1961. 266 с.
5. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды: М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1976. 736 с.
6. Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации // Экологическое планирование и управление. 2008. № 7. С. 10–25.
7. Котлов И.П., Пузаченко Ю.Г. Структура рельефа русской равнины как ландшафтообразующего фактора. Ландшафтное планирование: общие основания. Методология, технология / Тр. междунар. шк.-конф. "Ландшафтное планирование" М.: Изд-во Геогр. фак. МГУ, 2006. С. 166–172.
8. Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии. М.: Наука, 1985. 137 с.
9. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях М.: Изд-во АСАДЕМА, 1985. 416 с.
10. Пузаченко М.Ю. Мультифункциональный ландшафтный анализ юго-запада валдайской возвышенности. Дисс. канд геогр. наук. 2009 г. Автореферат находится по адресу: (<http://igras.ru/files/f.2009.11.28.18.10.36..1.pdf>).
11. Пузаченко М.Ю. Актуализация ландшафтной карты на основе дистанционной информации (на примере Северного Кавказа) Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых. Матер. конф. мол. сотrud. и аспиран. Ин-та пробл.

- экологии и эволюции им. А.Н. Северцова 10–11 апреля 2008 г. М.: КМК, 2008. С. 318–328.
12. Пузаченко Ю.Г., Пузаченко А.Ю. Семантические аспекты биоразнообразия // Журн. общая биологии. 1998. Т. 57. № 1. С. 1–43.
 13. Салищев К.А. Картография. Советская география. М.: Гос. изд-во геогр. лит-ры, 1960. С. 73–89.
 14. Салищев К.А. Комплексное картографирование, Советская география. М.: Госуд. изд-во геогр. лит-ры, 1960. С. 336–343.
 15. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. общей биологии. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
 16. Тишков М.С., Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А. Анализ физико-географической репрезентативности // Сб. Особо охраняемые природные территории России. Современное состояние и перспективы развития. М.: Орбис-Пиктус, 2009.
 17. Степанов И.Н. Потоки карт пластики рельефа – формализованные экологические системы // Мат. конф. “Математическое моделирование в экологии” ЭкоМатМод-2009. г. Пущино, Россия. С. 262–263.
 18. Степанов И.Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты. М.: Наука, 2005. 230 с.
 19. Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К. Энслейна, Э. Рэлстона, Г.С. Уилфа. М.: Наука, 1986. 464 с.
 20. Трасс Х.Х. Геоботаника. История и современные тенденции развития. Л.: Наука, 1976. 252 с.
 21. Юрковская Т.К. Геоботаническое картографирование и составление аналитических карт растительности. актуальные проблемы геоботаники // III всерос. шк.-конф. Петрозаводск, 2007.
 22. Karte der naturlichen Vegetation Europas. М.: 2500000. Bonn-Bad-Godesberg / Eds. Bohn U. Neuhäusl. 2000. 524 p.
 23. Global land cover facility (<http://www.glcf.umd.edu/index.shtml>) 2010.
 24. Krenke, A.N., Puzachenko J.G., Siunova E.V. Constructions of soil cartographical models based on remote sensing information and traditional maps. 4th Global Workshop on Digital Soil Mapping. Rome., 2010.
 25. Puzachenko J. Biogeocoenosis as an Elementary Unit of Biogeochemical Work in the Biosphere, In Sven Erik Jorgensen and Brian D. Fath (Editor-in-Chief), Global Ecology. V. [1] of Encyclopedia of Ecology, 5 vols. Oxford: Elsevier, 2008. P. 396–402.
 26. Stone, T. A., P. Schlesinger. 2003. RLC Vegetative Cover of the Former Soviet Union, 1990. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAC/700
 27. WorldClim (<http://www.worldclim.org/>) 2005.

More Accurate Content of Thematic Maps of the Basis of Remote Sensing Data

A.N. Krenke (Junior), M.Yu. Puzachenko, Yu.G. Puzachenko

Institute of Geography, RAS

Solution of the task of the content correction of its pick out on the base of modern remote information from Landsat satellite is demonstrated on the example of analyses of the USSR maps' fragment of vegetation at a scale 1 : 4000 000. Application of discriminate analyses is discussed. It is shown, that it becomes possible to specify the boundaries as well as picking out a transitional conditions and features of the vegetation, which were absent at the map, but are presented in spectrum of reflecting solar radiation.