

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА\*

Н. Б. ЕРМАКОВ, М. А. ПОЛЯКОВА

*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,  
Новосибирск, Россия*

e-mail: brunnera@mail.ru

Д. Ю. ПОПОВ, В. В. ГОЛОМОВЗИН

*Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Modeling of spatial organization of vegetation has been performed in key area in the Sarly river basin (the Western Sayan Mts). Cataloguing of phytocoenotic diversity was carried out on the basis of syntaxonomic analysis of original data and with the use of TWINSPLAN method. Peculiarities of relations of plant communities with leading ecological factors were demonstrated in ordination patterns produced with the use of methods of gradient analysis. Direct and indirect features of vegetation types on satellite images Landsat-7 (resolution of 30 m) were revealed with the use of standard methods of Erdas 8.7. Development of thematic patterns “vegetation-relief” and large-scale maps was realized in ArcGis 8.3. The final large-scale cartographic pattern of spatial organization of vegetation has been made as a result of integration of thematic layers of decoded satellite information and digital pattern “vegetation-relief”. Algorithm of computational technologies for development of cartographic patterns of spatial organization of vegetation for mountain areas has been described.

## Введение

Геоботанические карты дают синтезированное представление о разнообразии растительного покрова любой территории, а также выступают основой рационального природопользования. Широкое использование современных информационных технологий открывает новые возможности для исследования пространственной организации растительности и создания геоботанических карт нового поколения. Вне сомнения, что

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-04-48971-а и № 05-07-98011-р\_объ\_в).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2007.

ближайшее будущее исследований в данном направлении связано с созданием тематических геоинформационных систем (ГИС), максимально объединяющих и связывающих все типы геоботанической и эколого-географической информации. Картографическое моделирование растительности с использованием современных информационных технологий производится на основе организованной эколого-биологической информации в ГИС и последовательной реализации четких алгоритмов обработки этой информации: от анализа первичных геоботанических данных (классификации, ординации пробных площадей), выявления пространственных единиц растительности до автоматизированного оконтуривания конкретных полигонов — создания собственно картографической модели. Эти возможности в настоящее время реализованы в стандартных пакетах баз данных (в том числе и специализированных геоботанических), в географических информационных системах, методах автоматической классификации и ординации растительных сообществ, методах обработки данных дистанционного зондирования.

Цель настоящего исследования — отработка информационных технологий создания картографических моделей пространственной организации экосистем горных территорий на основе обработки данных дистанционного зондирования, результатов изучения закономерностей высотно-пооясного и эколого-топографического распределения разнообразия растительных сообществ и создания моделей растительность — рельеф. Все исследования выполнены на ключевом полигоне, расположенном на территории Саяно-Шушенского биосферного заповедника в Западном Саяне.

## 1. Характеристика района исследований

Ключевой полигон, на котором было выполнено моделирование пространственной организации растительности, находится в бассейне р. Сарлы — левого притока р. Енисей (рис. 1). Территория ключевого полигона характеризуется общими климатическими факторами, обусловленными ее положением в континентальном климатическом секторе, в “дождевой тени” осевой части Западного Саяна [1, 2]. Среди главных циркуляционных процессов атмосферы, определяющих специфику климатической обстановки на этой территории, выделяется влияние зимнего Азиатского антициклона, приводящего к радиационному выхолаживанию и формированию холодного воздуха, особенно в межгорных котловинах и долинах, и западного (атлантического) переноса влажных воздушных масс. Барьерная роль Осевого хребта Западного Саяна на пути перемещения западного переноса влаги приводит к проявлению эффекта барьерной тени в более южных и восточных горных массивах, сопровождающегося аридизацией климата и значительным возрастанием его континентальности. В соответствии со схемой биоклиматических подразделений (климатическими фациями) территории гор Южной Сибири [3] исследованная территория располагается в границах умеренно влажной антициклонической климатической фации. Мезоклимат здесь имеет выраженные черты засушливости (среднее годовое количество осадков 389 мм, в теплый период — 306 мм, в холодный период — 83 мм, с. Нижне-Усинское), а также отмечается значительная разница в температурных показателях в летнее (июль +16 °С) и зимнее (январь –27 °С) время, обуславливающая высокие значения континентальности климата (коэффициент континентальности Конрада 69). Среднегодовая температура –3.7 °С [4].

Геологические условия характеризуются наличием типичных для гор Южной Сибири древних горных цепей на палеозойских и более древних платформах, сильно дену-



Рис. 1. Географическое положение ключевого полигона (штриховая линия) на Западном Саяне

дированных и возрожденных неотектоническими сводово-глыбовыми движениями [5]. Основной тип рельефа — эрозионно-денудационные среднегорья, имеющие высоты от 500 до 1800...2300 м. Преобладают низкие высоты (1200...1500 м) и древние остаточновышинные пенепленизированные поверхности денудационного рельефа. На высотах 2000 м и выше наблюдаются остатки древней поверхности денудации, которые в районе Сарлинского хребта представляют собой гольцовые плосковершинные возвышенности, чередующиеся с плоскими седловинами.

## 2. Данные и методы

Основой выполненного исследования послужили следующие типы данных.

1. Оригинальные геоботанические описания растительности бассейна р. Сарлы, выполненные в различных высотных подразделениях растительности. Всего в исследование было вовлечено 69 полных геоботанических описаний.

2. Описание эколого-фитоценологических профилей и пространственных комбинаций растительности.

3. Результаты полевого дешифрирования космического снимка Landsat-7 с пространственным разрешением 30 м.

4. В качестве географической основы использовалась электронная векторная модель рельефа в масштабе 1 : 200 000.

Исследования выполнялись на территории Саяно-Шушенского биосферного заповедника в течение двух полевых сезонов 2004 и 2005 гг. В первый год работа заключалась в изучении разнообразия растительных сообществ района и описании экологических закономерностей их формирования. Второй год полевых исследований был посвящен идентификации выявленных типов растительности и их пространственных сочетаний на космическом снимке.

Технологически процесс исследований представил серию последовательных этапов, на каждом из которых были задействованы современные информационные технологии.

1. Представление данных в открытой геоинформационной системе “Биоразнообразие и динамика экосистем Урала и Сибири”, которая включает слои картографической информации (серии электронных векторных и растровых средне- и мелкомасштабных географических карт), космических снимков, картографической климатической модели, тематических карт растительного покрова, а также модуль связанной с ГИС базы данных геоботанических описаний, типологических и пространственных единиц лесной растительности. Базовой информацией моделирования выступили конкретные полные геоботанические описания, имеющие четкую географическую привязку и в настоящее время хранящиеся в электронной базе Turboveg [6]. Всего в исследование было вовлечено 69 геоботанических описаний. При обработке описаний для каждого вида учитывалась его количественная характеристика — встречаемость по равноинтервальной пятибалльной шкале.

2. Инвентаризация фитоценотического разнообразия, которая проводилась на основе синтаксономического анализа оригинальных первичных данных и привлечения метода TWINSpan [7].

3. Выявление характера связей растительных сообществ с ведущими экологическими факторами, построение ординационных моделей на основе применения метода градиентного анализа растительных сообществ: Detrended correspondence analysis. Данный метод, основанный на исследовании флористических признаков сообществ, ориентирован на нахождение основных экологических факторов (градиентов), определяющих общую структуру и направления варьирования объектов в многомерном пространстве на изучаемой территории. Полученные в результате анализа ординационные оси интерпретировались в дальнейшем как градиенты факторов (температурный режим, увлажнение, характер подстилающих пород) или комплексных факторов (топографические элементы — высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склона) на основе исследования состава индикационных для определенных факторов групп видов и особенностей структуры сообществ.

4. Выявление прямых и косвенных диагностических признаков территориальных подразделений растительности осуществлено в полевых исследованиях методом дешифрирования космических снимков Landsat-7 с разрешением 30 м на основе методов прикладного пакета Erdas.

5. Построение тематических ординационных и картографических моделей растительные сообщества — рельеф выполнено на основе растровых ГИС-моделей климата и рельефа на исследуемую территорию и с использованием функций ArcGis-8.3.

6. Построение результирующей крупномасштабной картографической модели пространственной организации растительности на основе интеграции слов дешифрирования космической информации и цифровых моделей растительность — рельеф.

Технологическая последовательность вычислений была аналогичным образом реализована при разработке модели биотопов в Западном Саяне [8].

### **3. Типы растительных сообществ бассейна р. Сарлы и их ординация**

Традиционно при картировании растительности Южной Сибири используются пространственные сочетания единиц, выявленных на основе эколого-фитоценотического подхода [9–14]. В настоящей работе также использован данный подход. Важное вни-

мание уделялось структурно-фитоценотическим (физиономическим) признакам растительных сообществ, необходимым для распознавания типов растительности на космическом снимке. В целях более полного отражения экологических свойств растительных сообществ по соотношению составляющих их экологических групп видов растений была выполнена количественная обработка 69 геоботанических описаний в программе TWINSpan. При этом особое внимание уделялось не определению синтаксономического статуса того или иного типа растительности (при картировании используются единицы различного ранга), а экологическим (а также эколого-топографическим) свойствам выявленных единиц и соответствию их размерности базовому масштабу исследований. В результате экологическое содержание каждой единицы было оценено соотношением экологических индикационных групп видов по отношению к ведущим режимам — увлажнения, теплообеспеченности, петрографического состава подстилающих пород. Анализ экологических свойств типов растительных сообществ, выявление экологических серий по градиентам ведущих факторов выполнен с использованием одного из методов градиентного анализа — ДСА-ординации. Полная обработка геоботанической информации была ориентирована на выявление таких подразделений растительности, которые максимально отражали бы ее высотно-поясные, экспозиционные, ландшафтно-динамические различия — наиболее значимые для растительного покрова горных районов с четко выраженным континентальным климатом.

Описанное разнообразие растительности бассейна р. Сарлы представлено 29 единицами растительных сообществ, представляющих три основных типа растительности.

#### **Степные сообщества**

1. Злаково-ковыльные (*Koeleria cristata* — *Stipa capillata*) степи.
2. Стоповидноосочковые (*Carex pediformis*) петрофитные степи.
3. Селагинелловые (*Selaginella sanguinolenta*) петрофитные степи.
4. Овцецовые (*Helictotrichon altaicum*) луговые степи.
5. Кустарниковые (*Spiraea media*) остепненные заросли.
6. Петрофитные полынно-овцецовые (*Artemisia gmelinii* — *Helictotrichon altaicum*) степи.
7. Петрофитные сообщества затененных скал с *Hylotelephium populifolium*.
8. Заросли высоких кустарников (*Cotoneaster melanocarpus*, *Caragana arborescens*, *Spiraea media*).
9. Петрофитные сообщества *Selaginella sanguinolenta* затененных скал.

#### **Лесные сообщества**

10. Сосновые и лиственнично-сосновые осочково(*Carex pediformis*)-ритидиевые(*Rhytidium rugosum*) остепненные леса.
  - 10а. Вариант: сосново-лиственничные и лиственничные осочково-ритидиевые остепненные леса.
11. Березово-лиственнично-сосновые вейниково(*Calamagrostis pavlovii*)-ирисово(*Iris ruthenica*)-разнотравные(*Agrimonia pilosa*, *Cruciata krylovii*) подтаежные леса.
12. Березово-лиственничные вейниково(*Calamagrostis pavlovii*)-осочковые(*Carex macgouga*) подтаежные леса.
13. Кедрово-елово-лиственничные вейниково(*Calamagrostis obtusata*)-брусничные леса нижней части таежного пояса.
14. Кедрово-лиственничные спирейно(*Spiraea chamaedrifolia*)-бадановые леса нижней части таежного пояса.
15. Кедрово-лиственничные бадановые леса нижней части таежного пояса.

16. Кедрово-елово-лиственничные мелкотравно(*Cerastium pauciflorum*)-зеленомошные(*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*) леса нижней части таежного пояса.

17. Кедровые баданово-лишайниково(*Cladonia arbuscula*)-зеленомошные(*Hylocomium splendens*) таежные леса.

18. Лиственнично-елово-кедровые осоково(*Carex iljinii*)-бруснично-лишайниково(*Cladonia rangiferina*)-зеленомошные(*Hylocomium splendens*) таежные леса верхней части таежного пояса.

19. Кедровые бруснично-зеленомошные леса с *Rhododendron aureum*.

20. Кедровые вейниково(*C. pavlovii*)-зеленомошные леса.

#### **Высокогорные сообщества**

21. Кедровые рододендрово(*Rhododendron aureum*)-ерниковые(*Betula rotundifolia*) подгольцовые редколесья.

22. Кедровые рододендрово(*Rhododendron aureum*)-ерниково(*Betula rotundifolia*)-черничные (*Vaccinium myrtillus*) подгольцовые редколесья.

23. Ерники (*Betula rotundifolia*) зеленомошные в подгольцовом поясе.

24. Ерниковая (*Betula rotundifolia*) мохово-лишайниковая (*Cladonia stellaris*, *Flavocetraria cucullata*) тундра, иногда с единичными кедром.

25. Дриадовая (*Dryas oxyodonta*) тундра.

26. Сиббальдиевый (*Sibbaldia procumbens*) луг.

27. Петрофитные сообщества *Juniperus pseudosabina*, *J. sibirica* по крупнообломочным осыпям.

28. Пустоши с *Vaccinium myrtillus*.

29. Альпийские низкотравные (*Viola altaica*, *Dracosephalum grandiflorum*, *Festuca ovina*) луга.

## **4. Ординация растительных сообществ**

Исследование экологических и эколого-топографических закономерностей организации растительного покрова бассейна р. Сарлы выполнено с использованием метода непрямого градиентного анализа — Detrended Correspondence Analysis (ДСА-ординация). Результаты разбиения совокупности сообществ на экологически значимые группы и характер взаиморасположения выделенных групп визуализированы на диаграмме ДСА-ординации (рис. 2).

Результаты ординации показали различную роль ведущих экологических факторов (влажнотеплообеспеченность, характер субстрата) в дифференциации растительного покрова бассейна р. Сарлы. Вместе с тем анализ результатов ординации выявил также важные для картографирования растительности закономерности дифференциации растительных сообществ по топографическим элементам — высотным уровням горных хребтов и склонам гор различной ориентации. Бассейн р. Сарлы представляет собой горную территорию с большой амплитудой абсолютных высот (450...2300 м), поэтому ось 1 четко отразила последовательность высотно-поясных подразделений растительных сообществ: подтаежно-лесостепных (2.9...6.9), таежных (0.7...1.5) и высокогорных (0...1.1).

Экологическая интерпретация главной оси 1 может быть дана как оси проявления комплексного экологического градиента двух ведущих факторов — тепло- и влагообеспеченности, параллельно (но разнонаправленно) меняющихся с увеличением абсолют-

ной высоты. В то же время характер распределения единиц растительности на главных осях ординации в пределах каждого из высотно-поясных подразделений существенно различается, индицируя высокое экологическое своеобразие последних.

Наиболее четко ординация продемонстрировала различия экологических амплитуд сообществ, слагающих каждый из высотных поясов по фактору увлажнения. Так, сообщества подтаежно-лесостепного пояса занимают на оси 1 наибольший диапазон значений (2.9...6.9) и формируют на данной оси ряд последовательного замещения по градиенту увлажнения из семи типов: 1 — наиболее сухие злаково-ковыльные степи, 2 — стоповидноосочковые луговые степи, 3 — овсецовые луговые степи, 4 — кустарниковые остепненные заросли *Spiraea media*, 5 — сосновые леса осочково-ритидиевые остепненные, 6 — березово-лиственнично-сосновые вейниково-ирисово-разнотравные подтаежные леса, 7 — березово-лиственничные вейниково-осочковые подтаежные леса.

На оси 2 DCA-ординации сообщества подтаежно-лесостепного пояса разделились на две группы по отношению к условиям каменистости субстрата:

а) диапазон значений (1.8...2.3) на оси 2 занимают сообщества скал, осыпей и местообитаний со слабо развитой почвой (селагинелловые петрофитные степи, петрофитные сообщества затененных скал с *Hylotelephium populifolium*, кустарниковые сообщества каменистых местообитаний крутых склонов с *Caragana arborescens*);

б) диапазон значений (1.2...1.8) оси 2 DCA-ординации занимают сообщества степей и гемибореальных лесов, формирующиеся в местообитаниях с умеренной каменистостью субстрата (рис. 2).

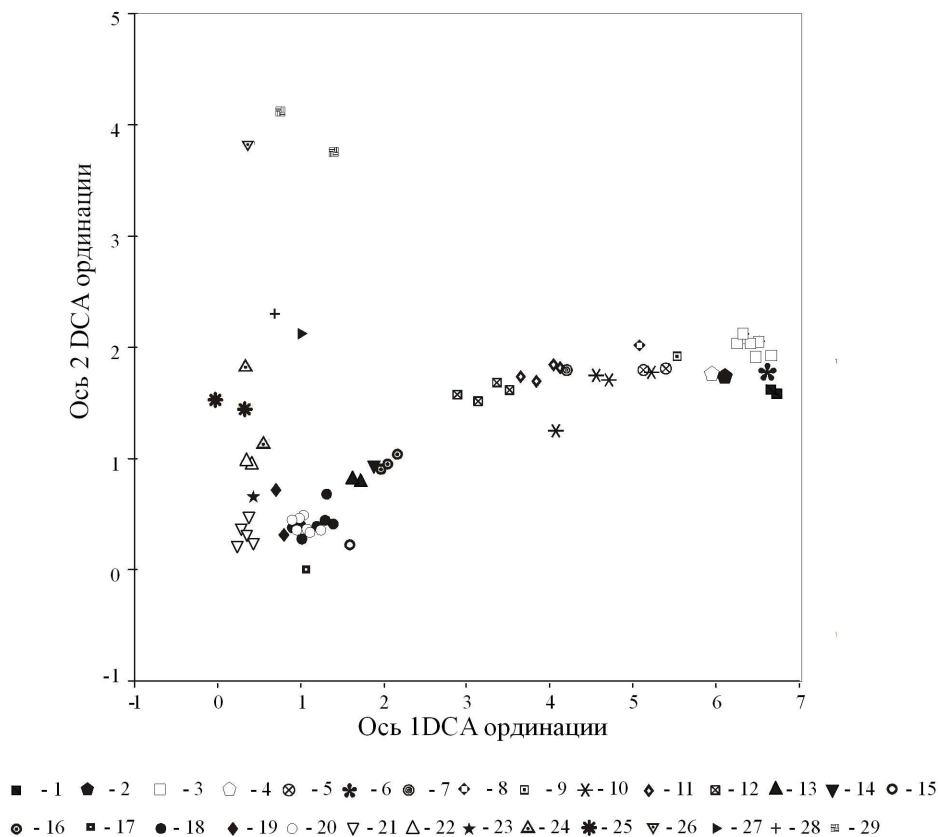


Рис. 2. DCA-ординация растительных сообществ бассейна р. Сарлы. Номера условных обозначений соответствуют номерам сообществ в разделе "Типы растительных сообществ бассейна р. Сарлы и их ординация"

При этом на первой и второй осях распределяются сообщества, образующие литофитные серии в различных по режиму увлажнения местообитаниях. Так, на оси 1 ординации в диапазоне значений 6.2...6.8 одной группой располагаются сообщества литофитной серии, характерной для наиболее сухих местообитаний выпуклых нижних частей южных склонов гор: злаково-ковыльных (*Stipa capillata*) степей и селлагинелловых петрофитных степей, четко различающихся на оси 2. Аналогично в диапазоне значений 5...5.7 располагаются сообщества литофитной серии кустарниковых (*Spiraea media*) остепненных зарослей и петрофитных ксеромезофитных сообществ с *Selaginella sanguinolenta* затененных скал, замещающие предыдущую литофитную серию на выровненных и слабо вогнутых частях южных склонов гор. А в диапазоне значений 5.6...6.2 оси 1 располагается литофитная серия овсецовых (*Helictotrichon altaicum*) луговых степей и холоднопопынно-осочковых петрофитных степей, типичная для верхней части подтаежно-лесостепного пояса на южных склонах гор. Дифференциация сообществ подтаежно-лесостепного пояса по градиентам ведущих факторов на осях 1, 2 ординации раскрывает экологическую специфику данного пояса в целом как мезокомбинации самого нижнего яруса горного массива в пределах бассейна р. Сарлы.

Сообщества таежного пояса занимают центральное положение на оси 1 ординации, однако их экологический диапазон (0.7...1.5) намного меньше, чем у сообществ подтаежно-лесостепного пояса, и намного слабее выявляется экологическая дифференциация на главной оси. Тем не менее на оси 1 все сообщества таежного пояса подразделяются на два подпояса: нижний, представленный различными типами кедрово-елово-лиственничных смешанных лесов (1.7...2.3), и верхний, представленный кедровыми и лиственнично-кедровыми лесами (0.9...1.5). Ось 2 отражает закономерности, аналогичные подтаежно-лесостепному поясу, т. е. разделяет типы сообществ по отношению к характеру подстилающих пород и намечает литофильные серии. Для нижней части таежного пояса это: а) типичная для северных склонов гор серия кедрово-елово-лиственничных мелко травно-зеленомошных лесов и кедрово-лиственничных бадановых лесов; б) типичная для южных склонов гор серия кедрово-елово-лиственничных вейниково-брусничных лесов и кедрово-лиственничных спирейно-бадановых лесов. Для верхней части таежного пояса это литофильная серия кедровых вейниково (*S. pavlovii*)-зеленомошных лесов и кедровых баданово-лишайниково-зеленомошных таежных лесов.

Экспозиционные различия сообществ таежного пояса на ведущих осях ординации наблюдаются намного слабее, чем в подтаежно-лесостепном поясе. Практически только в нижнем подпоясе на оси 1 разделяются кедрово-елово-лиственничные вейниково-брусничные леса по склонам южной экспозиции и кедрово-елово-лиственничные мелко травно-зеленомошные леса по склонам северной экспозиции. В пределах верхнего подпояса таежного пояса разделения сообществ южных и северных склонов не наблюдается на осях 1 и 2 ординации.

Сообщества высокогорного пояса занимают наиболее узкий диапазон значений на оси 1 (основной диапазон 0...1.1), пересекаются с сообществами верхней части таежного пояса и не дифференцируются на данной оси на экологические типы. Разделение на экологические типы сообществ данного пояса наблюдается только на оси 2 ординации. Однако интерпретировать данную ось как проявление одного из факторов не представляется возможным, несмотря на некоторые очевидные закономерности. Главная среди этих закономерностей — дифференциация на оси 2 высокогорного пояса на высотные полосы. Самое нижнее положение (0.2...1.1) занимает типичное сочетание для подгольцового подпояса: кедровых рододендроново-ерниковых подгольцовых редколе-



сий по северным склонам, кедровых рододендрово-ерниково-черничных подгольцовых редколесий по южным склонам и ерников зеленомошных подгольцового пояса. Далее, в диапазоне значений 1.1...1.9 следует характерное сочетание для подпояса типичных высокогорных тундр: ерниковая мохово-лишайниковая тундра, ерниковая тундра с единичными кедром и дриадовая тундра. Далее по оси 2 (2.1...2.3) расположены петрофитные группировки с участием можжевельников сибирского, ложноказацкого и черничные пустошные луга. Завершают ряд на оси 2 сообщества альпийских нивальных низкотравных и сиббальдиевых лугов (3.6...4.2).

Выявленная на оси 2 последовательная смена сообществ, несмотря на четко выраженные некоторые черты высотной зональности, не может быть обусловлена только фактором теплообеспеченности, так как в верхних частях гор усиливаются эрозионные процессы, приводя также к усилению литологического фактора в вертикальном направлении. Последний, несомненно, играет важную роль в дифференциации высокогорных растительных сообществ на оси 2, как это наблюдалось в составе таежного и подтаежно-лесостепного поясов.

Результаты выполненной ординации имеют важное значение для исследования пространственной организации растительности, поскольку определяют характер базовых пространственных единиц, градиенты и иерархию экологических факторов, обуславливающих высотно-поясные, литологические ряды растительных сообществ, и демонстрируют закономерности экспозиционной дифференциации растительности.

## 5. Результаты дешифрирования космической информации

Дешифрирование космического снимка, т. е. установление прямых и косвенных признаков пространственных сочетаний растительных сообществ по спектральным характеристикам и в масштабе разрешения изображения, было выполнено в бассейне р. Сарлы в полевых условиях с использованием результатов классификации и ординации.

Для получения базовой информации по пространственной организации экосистем (основы картографического моделирования) использовались спектрально-зональные космические снимки Landsat-7 с пространственным разрешением 30 м. Их обработка осуществлялась с использованием стандартного метода классификации изображения без обучения ISODATA (unsupervised classification), предлагаемого прикладным пакетом Erdas 8.7.

Выбор метода классификации и большого количества классов обусловлен спектральными характеристиками растительного покрова исследуемого ключевого участка. На рис. 3 показаны спектральные характеристики элементов местности. Видно, что диапазон изменения яркостей спектральных характеристик растительного покрова занимает узкую полосу по сравнению с полным диапазоном их изменения.

Кроме того, зависимость спектральных характеристик от типа леса, проективного покрытия, количества примесей других пород, крутизны склонов, влажности на момент съемки, типа грунта подстилающей поверхности и других факторов приводит к тому, что одинаковые типы леса, которые находятся в разных местах ключевого участка, могут иметь разные спектральные характеристики. Причем в пространстве признаков такие участки не являются соседними. Это приводит к тому, что попытки использовать методы классификации с небольшой избыточностью классов не дают результатов,

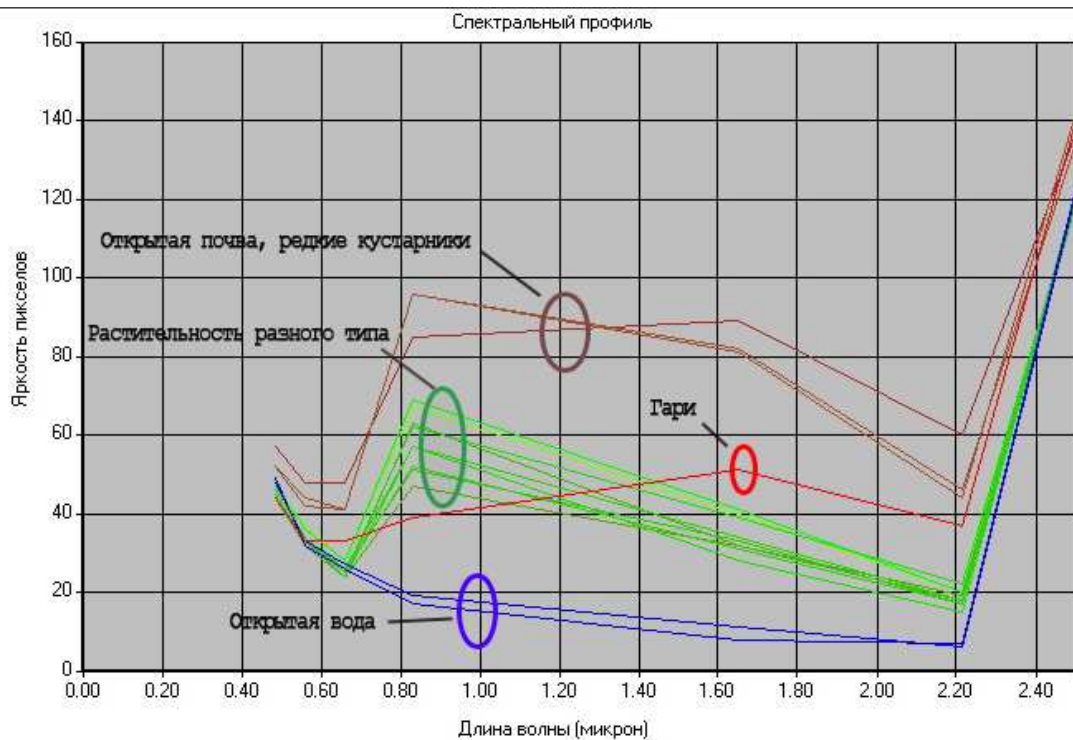


Рис. 3. Спектральные характеристики элементов местности ключевого участка

которые соответствуют полевым исследованиям. Поэтому снимок на начальной стадии классифицировался на 220 классов, которые затем объединялись в соответствующие им типы растительности на основе наземных наблюдений.

Для каждого из классов была установлена принадлежность тому или иному подразделению растительного покрова. Последнее устанавливалось непосредственно в полевых условиях маршрутным методом с идентификацией признаков растительности по спектральным характеристикам групп пикселей одного класса. По результатам дешифрирования снимков Landsat-7 был определен минимальный масштаб растрового изображения, на котором наиболее полно выявлялись количественные (площадные) и качественные (индикационные) характеристики растительного покрова. Он составил 1 : 50 000, т. е. картографическая модель может быть охарактеризована переходным масштабом от крупного к среднему.

В результате полевого дешифрирования были выявлены следующие признаки растительности и местообитаний, достоверно различимые на космическом снимке:

- типы растительности, образованные хорошо различимыми типами биоморф (леса, редколесья, заросли кустарников, травянистая растительность — физиономические типы растительности);

- местообитания с различной степенью сомкнутости растительного покрова — обнаженные скалы и каменные россыпи с отсутствующей или разреженной растительностью (проективное покрытие до 35%), петрофитные кустарниковые и травяно-кустарниковые группировки с сомкнутостью растительности от 35 до 65%, зональные хорошо сомкнутые травянистые сообщества с проективным покрытием свыше 65%, а также свежие гари, водоемы.

Поскольку исследованная территория полностью входит в состав Саяно-Шушенского биосферного заповедника, на ней отсутствовали типы растительности, связанные с хо-

зайственной деятельностью человека и обычно хорошо различимые на космических снимках. На исследованной территории также отсутствовали такие обычно хорошо различимые категории, как серии растительных сообществ речных пойм и болотные массивы в связи с местными особенностями эрозионного крутосклонного сильно расчлененного рельефа, а также затоплением долины Енисея в связи со строительством Саяно-Шушенской ГЭС. Отдельным классом объектов выступили крутые затененные склоны гор со спектральными показателями яркости, близкой к нулю.

Дешифрирование растительности по прямым признакам (спектральным характеристикам объектов) позволило четко выявить сочетания типов растительных сообществ таежного пояса и отделить его от подтаежно-лесостепного и высокогорного. В то же время спектральные характеристики подтаежно-лесостепного и высокогорного сообществ оказались очень близкими. Недостоверно различались и образовывали одну группу физиономически сходные, но экологически различные сообщества кустарников лесостепного и подгольцового поясов. Аналогично достоверно не различались луговые петрофитные степи, дриадовые тундры и высокогорные пустошные луга, а также петрофитные группировки по осыпям и скалистым обнажениям.

Крупные физиономические типы лесной растительности с различной степенью четкости подразделялись на категории, характеризуемые разными растениями-доминантами верхних ярусов или степенью сомкнутости верхнего яруса. Так, идентифицировались сосновые и лиственнично-сосновые леса подтаежно-лесостепного пояса. В таежном поясе удалось наметить разбиение на два основных высотно-зональных подпояса: верхний — с преобладанием монодоминантных кедровых лесов и нижний — с преобладанием смешанных темнохвойно-лиственничных лесов. Однако выполненное разбиение таежного пояса по изображению получилось недостаточно четкое, несмотря на то, что при

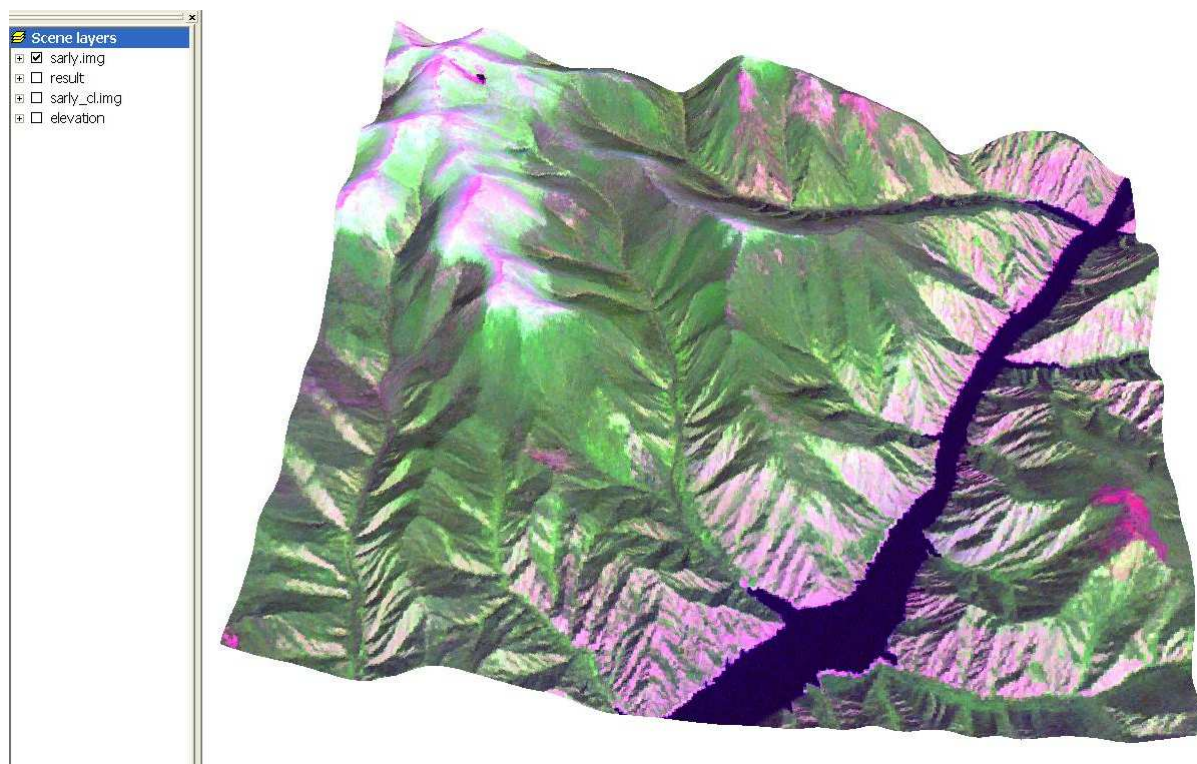


Рис. 4. Трехмерная модель космического снимка на ключевой полигон

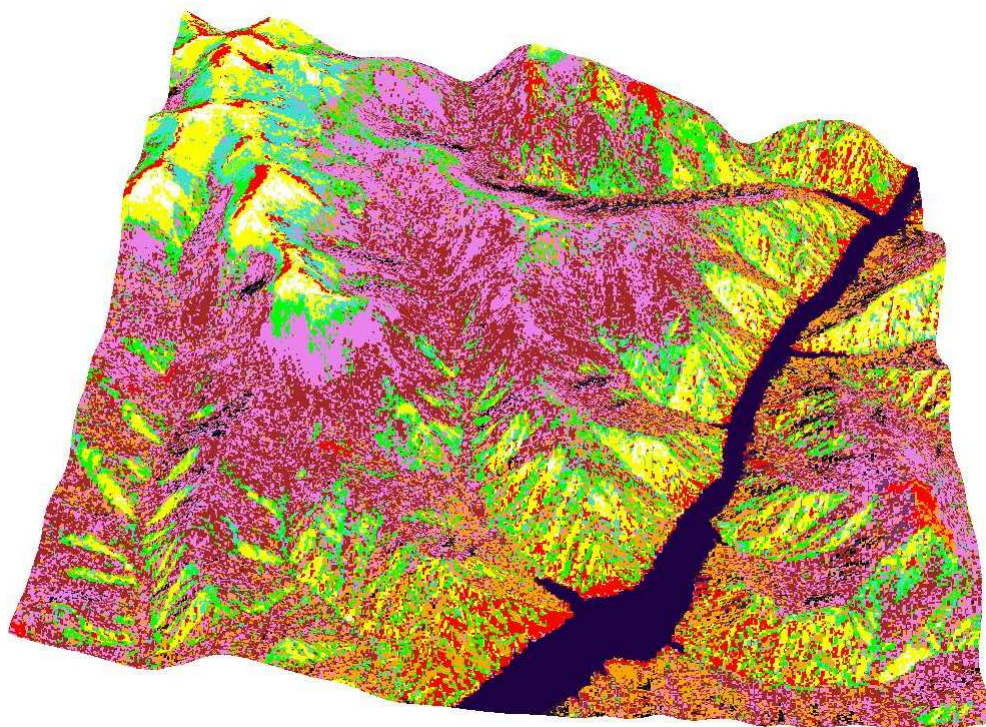


Рис. 5. Первичная трехмерная модель растительного покрова ключевого полигона по результатам дешифрирования космического снимка

наземных полевых исследованиях и в процессе камеральной обработки полевых описаний граница между этими двумя подпоясами выявляется достаточно определенно.

В результате дешифрирования космического снимка (рис. 4) и анализа спектральных характеристик растительности была составлена первичная модель эколого-физиономических типов ключевого полигона (рис. 5). Типы растительных сообществ, выявляющиеся по прямым признакам: 1) травяные и кустарничково-травяные сообщества с сомкнутостью верхнего яруса свыше 65 %; 2) травяные петрофитные сообщества с сомкнутостью верхнего яруса 35–65 %; 3) разреженные травяно-кустарниковые и кустарниковые группировки по каменистым россыпям и скалистым обнажениям с сомкнутостью до 35 %; 4) сомкнутые заросли кустарников; 5) сосновые и лиственнично-сосновые травяные гемибореальные леса; 6) кедрово-елово-лиственничные мелкотравно-зеленомошные таежные леса; 7) кедровые и лиственнично-кедровые кустарничково-зеленомошные таежные леса; 8) подгольцовые кедровые редколесья с кустарниковым ярусом; 9) спиреево-вейниковые производные послепожарные сообщества.

## 6. Картографическое моделирование пространственной организации разнообразия растительного покрова

Картографическое отражение закономерностей пространственного размещения разнообразия растительных сообществ — одно из наиболее сложных и трудоемких исследований в фитоценологии. Его удачное выполнение зависит не только от детальности и качества собственно геоботанических данных, но и от возможностей, представляемых географической основой, спектральными характеристиками изображения (космическо-

го снимка) исследуемой территории, а также от возможностей вовлекаемых компьютерных технологий. На финальной стадии настоящего исследования выполнена технологическая последовательность операций по интегрированию в одной картографической модели выявленных экологических, ландшафтных закономерностей распространения разнообразия растительных сообществ, а также результатов дешифрирования космического снимка и моделирования рельефа.

По результатам прямого дешифрирования космического снимка получена модель распространения эколого-физиономических типов сообществ, которая недостаточно отражала разнообразие растительности как на высотно-поясном, так и на эколого-топографическом уровне. Для создания более адекватной модели растительного покрова в качестве дополнительных использованы косвенные признаки, из которых два ведущих, подтвержденных результатами ординации и определяемых спецификой горного рельефа. Это пространственное распределение сочетаний растительных сообществ по высотной зональности (по значениям абсолютных высот) и ориентации склонов гор (по значениям азимутов). Результаты классификации и градиентного анализа растительности полигона позволили на основе косвенных признаков дифференцировать каждую из эколого-физиономических единиц растительности, выявленную на космическом снимке на высотно-поясные, экспозиционные сочетания и литофильные серии. Состав пространственных единиц для отображения структуры растительного покрова в финальной модели представлен в таблице.

Технологически картографическое моделирование растительность — орография выполнено с использованием прикладного пакета ArcGis, его модулей ArcMap, ArcCatalog, ArcScene. В качестве исходных использовались данные радарной топографической съемки — Shuttle radar topographic mission (SRTM), которые позволили вычислять производные информационные модели косвенных признаков организации растительного покрова — слой азимутов (ориентации склонов в градусах) и слой абсолютных высот. Новый слой — пространственные единицы растительности — вычислялся как отклик каждой

Пространственные единицы растительности бассейна р. Сарлы, полученные на основе космического снимка и градиентного анализа сообществ

№ п.п.	Название единиц растительности
	<b>Подтаежно-лесостепной пояс</b>
1	Сочетание злаково-ковыльных степей, стоповидно-осочковых петрофитных степей на крутых щебнистых южных склонах и селлагинелловых петрофитных степей по выходам скал
2	Овцецовые ( <i>Helictotrichon altaicum</i> ) луговые степи в сочетании с петрофитными полынно-овцецовыми степями по южным склонам
3	Скалы и осыпи с разреженными группировками степных кустарников и фрагментами селлагинелловых петрофитных степей
4	Кустарниковые остепненные заросли <i>Spirea media</i> по южным склонам в сочетании с петрофитными сообществами <i>Selaginella sanguinolenta</i> на затененных скалах
5	Кустарниковые остепненные заросли ( <i>Cotoneaster melanocarpus</i> , <i>Caragana arborescens</i> , <i>Spiraea media</i> ) в сочетании с рединами <i>Pinus sylvestris</i> и <i>Larix sibirica</i> по южным склонам
6	Сосновые и лиственнично-сосновые осочково-ритидиевые остепненные леса в сочетании с зарослями кустарников ( <i>Cotoneaster melanocarpus</i> , <i>Caragana arborescens</i> , <i>Spiraea media</i> ) по южным склонам и петрофитных сообществ затененных скал с <i>Hylotelephium populifolium</i>

Продолжение таблицы

7	Сосново-лиственничные и лиственничные осочково-ритидиевые остепненные леса в сочетании с зарослями кустарников ( <i>Cotoneaster melanocarpus</i> , <i>Caragana arborescens</i> , <i>Spiraea media</i> ) по южным склонам и петрофитных сообществ затененных скал с <i>Hylotelephium populifolium</i>
8	Березово-лиственнично-сосновые вейниково-разнотравные леса в сочетании с березово-лиственничными вейниково-осочковыми лесами по северным склонам
9	Березово-лиственничные вейниково-осочковые леса в сочетании с петрофитными мезофильными сообществами затененных скал с <i>Polypodium vulgare</i> и <i>Hylotelephium populifolium</i> по северным склонам
	<b>Горно-таежный пояс</b>
	<i>Подпояс кедрово-елово-лиственничных смешанных лесов</i>
10	Кедрово-елово-лиственничные вейниково-брусничные леса в сочетании с березово-лиственничными вейниково-осочковыми и кедрово-лиственничными спирейно-бадановыми петрофитными лесами по южным склонам
11	Елово-кедрово-лиственничные осоково-бруснично-лишайниково-зеленомошные леса в сочетании с кедровыми бруснично-зеленомошными лесами по северным склонам
12	Кедрово-елово-лиственничные мелкотравно-зеленомошные леса в сочетании с кедрово-лиственничными бадановыми петрофитными лесами по северным склонам
13	Кустарниковые заросли ( <i>Caragana arborescens</i> , <i>Spiraea chamaedrifolia</i> ) и петрофитные редколесья таежного пояса
	<i>Подпояс кедровых и лиственнично-кедровых лесов</i>
14	Лиственнично-елово-кедровые осоково-бруснично-лишайниково-зеленомошные леса в сочетании с кедровыми бруснично-зеленомошными лесами с ярусом из <i>Rhododendron auricum</i> по северным склонам
15	Кедровые вейниково( <i>S. pavlovii</i> )-зеленомошные леса в сочетании с кедровыми баданово-лишайниково-зеленомошными петрофитными лесами по южным склонам
16	Кедрово-лиственничные вейниково( <i>S. pavlovii</i> )-зеленомошные леса в сочетании с кедровыми баданово-лишайниково-зеленомошными петрофитными лесами по южным склонам
17	Сочетание кедрово-лиственничных бадановых петрофитных лесов и несомкнутых петрофитных кустарничково-лишайниковых группировок по крупнообломочным осыпям в лесном поясе
18	Спиреево-вейниковые производные сообщества на месте гарей в лесном поясе
	<b>Высокогорный пояс</b>
19	Кедровые рододендроново-ерниковые редколесья в сочетании с ерниками зеленомошными подгольцового пояса
20	Кедровые рододендроново-ерниково-черничные подгольцовые редколесья
21	Ерники мохово-лишайниковые в сочетании с ерниками альпийско-низкотравно-моховыми и пустошами с <i>Vaccinium myrtillus</i>
22	Дриадовые тундры в сочетании с ерниками мохово-лишайниковыми
23	Дриадовые тундры в сочетании с альпийскими низкотравными лугами и сиббальдиевыми лугами
24	Разреженные петрофитные сообщества <i>Juniperus pseudosabina</i> и <i>J. sibirica</i> по крупнообломочным осыпям высокогорного пояса
25	Производные редколесья на месте гарей в подгольцовом поясе

точки территории на значение ее высоты и экспозиции в соответствии с диапазонами абсолютных высот и азимутов, выявленных для каждой из пространственных единиц растительности по результатам градиентного анализа.

При разработке информационной модели использовались векторная георегиональная модель ГИС, триангуляционная модель (TIN), сеточные модели (GRID). Средствами модуля 3D Analyst построена TIN-модель рельефа, которая затем была преобразована в GRID-модель (рис. 6) с шагом сетки  $L$  метров, каждый узел которой содержит значение высоты над уровнем моря для соответствующей точки территории. Средствами модуля Spatial Analyst на основе GRID-модели рельефа построена GRID-модель экспозиций склонов, в которой каждый узел содержит значение экспозиции в градусах для соответствующей точки территории (рис. 7).

В вычислении нового GRID-слоя (модели пространственных единиц растительности) участвовало три GRID-слоя: 1) растровая модель эколого-физиономических типов растительности, полученная по результатам дешифрирования космического снимка; 2) слой абсолютных высот; 3) слой значений азимутов склонов. В вычисленном новом GRID-слое каждый узел содержит код определенной пространственной единицы растительности для соответствующей точки территории.

Полученный слой представляет собой результирующую картографическую модель пространственной организации растительности ключевого полигона в бассейне р. Сарлы (рис. 8). Она в крупном масштабе отражает высотно-поясные и эколого-топографические закономерности формирования растительного покрова. Модель ориентирована также на задачи, связанные с мониторингом динамики экосистем на территории биосферного заповедника. Возможности выполнения таких задач обусловлены высоким разрешением снимка — 30 м, что в совокупности с точной GPS-привязкой пробных площадей позволяет успешно осуществлять непосредственно наземные наблюдения, в том числе и повторные разногодичные.

Для преобразования растровой модели в геоботаническую карту ключевого полигона требуется ее генерализация, т. е. приведение содержательной части, а также размеров контуров растительности к диктуемой масштабам снимка степени детальности. Разработанная легенда картографической модели растительности изначально была ориенти-

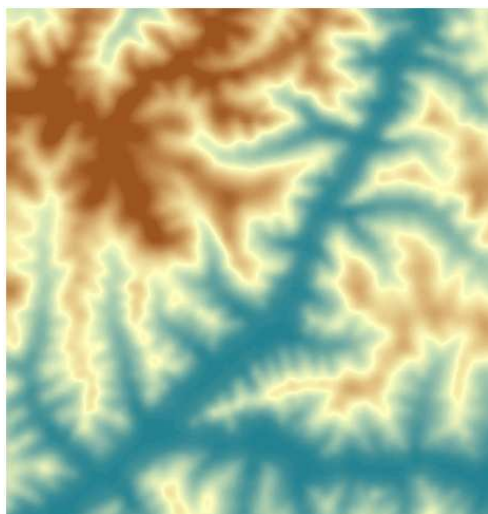


Рис. 6. Модель рельефа (абсолютные высоты)

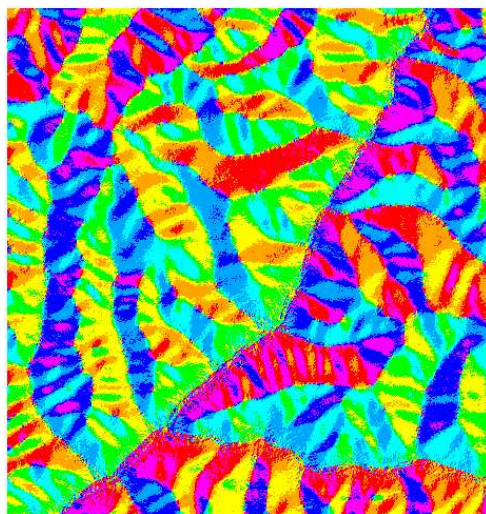


Рис. 7. Модель экспозиции склонов

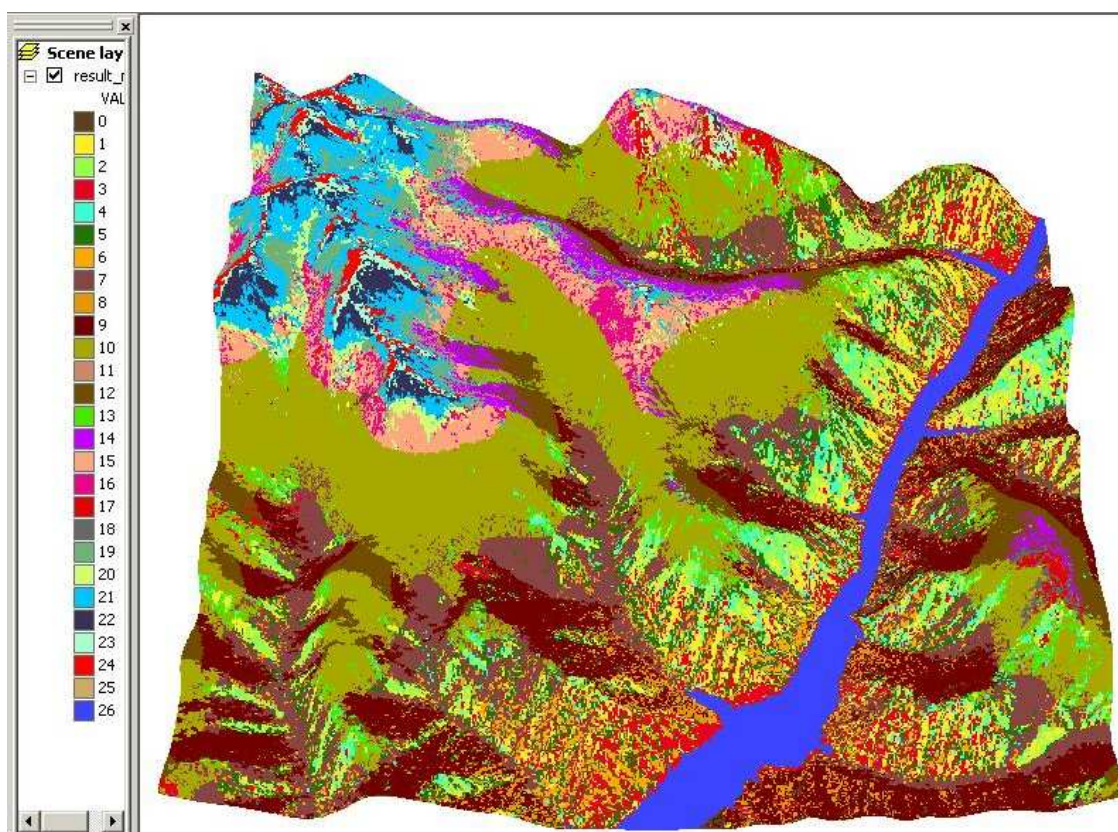


Рис. 8. Трехмерная картографическая модель пространственной организации экосистем ключевого полигона

рована на крупный масштаб, поэтому на финальной стадии создания геоботанической карты возникла необходимость только в генерализации изображения, т. е. в техническом объединении пикселей в однородные контуры растительности, соответствующие масштабу карты. Для объединения пикселей в однородные контуры была использована стандартная функция ArcGis “метод ближнего соседа”. Окончательное формирование картографической модели выполнено путем ее оцифровки в ArcGis.

## Заключение

Выполненное исследование посвящено изучению пространственной организации разнообразия растительного покрова и его динамики на основе использования современных вычислительных технологий. Созданная модель отражает дифференциацию пространственных единиц растительности в пространстве трех ведущих эколого-топографических факторов — высоты над уровнем моря, экспозиции склона, петрографического состава субстрата. Реализованные в процессе исследования информационные подходы позволили в картографической модели максимально реализовать сконцентрированные знания о типологическом составе растительных сообществ, особенностях их экологии, пространственной организации в конкретном регионе. Необходимо также отметить существенные отличия компьютерного картографического моделирования от традиционных картографических работ, где финальным итогом выступает тематическая карта на бумажном носителе.



Максимально полное представление об объеме, характере первичных геоботанических данных, примененных методах классификации, ординации дает возможность гораздо лучше понять те закономерности, которые автор отражает в конкретной картографической модели. Это также позволяет повторить моделирование, привнести и отразить в модели новые важные особенности и закономерности, которые выявляются при вовлечении новых дополнительных материалов. Такой подход приносит следующие новые возможности создания карт растительности, предоставляемые информационными технологиями.

1. Максимальная информационная характеристика каждого элементарного выдела на картографической модели. Система связанных баз данных геоботанических документов позволяет оперативно осуществить выборку и визуализировать не только конечный пункт легенды карты, но и всю информацию, лежащую в основе его выделения: геоботанические описания, синтаксономические единицы, графы классификации и ординации, классифицированные признаки данных дистанционного зондирования. В отсутствие единых подходов к классификации растительности и универсальных методов обработки данных это очень важно для понимания содержания каждой конкретной единицы.

2. Возможность оперативного улучшения и корректировки картографической модели в результате пополнения базовых информационных модулей ГИС новыми первичными данными, реализации новых технологий, отражения на карте новых выявленных закономерностей формирования растительности.

3. Максимальная четкость и открытость информационной системы и алгоритмов обработки данных предоставляет возможность для повторения моделирования другими исследователями и создания аналогичных, совместимых картографических моделей на соседние регионы.

4. Возможность оперативного преобразования исходной картографической модели растительности в тематические природоохранные, ресурсные и экспертно-аналитические карты, опираясь на связанные тематические модули информационной системы.

## Список литературы

- [1] ИСАЧЕНКО А.Г. Классификация ландшафтов СССР (применительно к целям обзорного ландшафтного картографирования) // Изв. ВГО. 1975. Т. 107, вып. 4. С. 302–315.
- [2] НАЗИМОВА Д.И., КОРОТКОВ И.А., ЧЕРЕДНИКОВА Ю.С. Основные высотно-поясные подразделения лесного покрова в горах Южной Сибири и их диагностические признаки // Структура и функционирование лесных биогеоценозов Сибири. V. Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева. М.: Наука, 1987. С. 30–64.
- [3] ПОЛИКАРПОВ Н.П., ЧЕБАКОВА Н.М., НАЗИМОВА Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.
- [4] СПРАВОЧНИК по климату СССР. Ч. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1966–1970. Вып. 7–27.
- [5] ВОСКРЕСЕНСКИЙ С.С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во МГУ, 1962. 352 с.
- [6] HENNEKENS S.M. TURBO(VEG). Software Package for Input, Processing, and Presentation of Phytosociological Data. User's guide. Lancaster, 1996. 59 p.

- [7] HILL M.O. DECORANA and TWINSpan, for Ordination and Classification of Multivariate Species Data: a New Edition, Together With Supporting Programs, in FORTRAN 77. Huntingdon: Institute of Terrestrial Ecology, 1979. 58 p.
- [8] ЕРМАКОВ Н.Б., АЛСЫНБАЕВ К.С. Моделирование пространственной организации лесного покрова южной части Западного Саяна // Сиб. эколог. журн. 2004. № 5. С. 687–702.
- [9] КУМИНОВА А.В. Растительный покров Алтая. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1960. 450 с.
- [10] КУМИНОВА А.В. Основные черты и закономерности растительного покрова // Растительный покров Хакасии. Новосибирск: Наука, 1976. С. 40–94.
- [11] КУМИНОВА А.В., ЕРМАКОВ Н.Б. Растительный покров северного фаса Алтая // Геоботанические исследования в Западной и Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. С. 4–30.
- [12] РАСТИТЕЛЬНОСТЬ Западно-Сибирской равнины. М.: ГУГК, 1976.
- [13] СОЧАВА В.Б. Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, 1979. 190 с.
- [14] БЕЛОВ А.В. Карта растительности юга Восточной Сибири // Геоботаническое картографирование. Л.: Наука, 1973. С. 16–30.

*Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.*