

Спутниковый мониторинг горных лесных экосистем на южной окраине бореальной области

Е.И. Пономарёв, Д.М. Исмаилова, Д.И. Назимова

*Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН,
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

В работе рассматриваются подходы к использованию дистанционных спутниковых данных низкого и среднего пространственного разрешения для обзорного картографирования горных лесных экосистем и мониторинга их функционирования в течение всего сезона вегетации. Приводятся результаты исследований, проводимых на трех ключевых участках, расположенных в Западном и Восточном Саянах, с 1960 г. Спутниковые данные низкого пространственного разрешения (NOAA/AVHRR, TERRA/Modis) на район исследований доступны за период 1996 – 2009 гг. Дано описание базы данных, разработанной по материалам проведения наземных исследований. Обсуждаются особенности функционирования рассматриваемых горных экосистем и связанные с этим изменения спектральных характеристик выделяемых классов растительности. Направление исследований актуально для организации эффективного управления лесами и мониторинга регионального и локального уровней.

Ключевые слова: горные бореальные леса, высотно-поясные комплексы, данные дистанционного зондирования, база данных, сезонный мониторинг, спектральные характеристики.

Введение

Мониторинг биоразнообразия и сезонного функционирования горных лесных экосистем юга Сибири требует активного привлечения данных спутникового зондирования. Уникальность южной окраины бореальной области Средней Сибири проявляется на ландшафтно-экологическом уровне. Контакт с горными экосистемами, отличающимися высоким уровнем климатического, ландшафтного и биологического разнообразия, определят специфику функционирования и высокую степень пространственной изменчивости экосистем на высотном градиенте.

Исследования, проводимые нами с 2000 г. на южной окраине бореальной области в горах Западного и Восточного Саяна, направлены на выявление и идентификацию основных высотно-поясных подразделений лесного покрова — от степи и лесостепи в котловинах и предгорьях до различных вариантов горной тайги, высокогорных лугов и тундр [1]. Несмотря на сложность общей картины и конфигурации зон, региональные биоклиматические модели растительности позволяют достаточно однозначно определить современные зоны по ключевым показателям климата – теплообеспеченности, влагообеспеченности и степени континентальности [2, 3, 4]. В то же время спутниковые съемки, осуществляемые в соответствующих спектральных диапазонах, позволяют проследить динамику изменения спектральных характеристик рассматриваемых зон, тем самым выявляя закономерности не только в пространстве, но и во времени. Это новый аспект изучения функционирования зональных экосистем. Данный подход эффективно работает при использо-

вании серии съемок исследуемого района, отражающей динамику развития в течение всего периода вегетации [5].

Цель многолетних исследований – разработка алгоритма сопряженного анализа спутниковых и наземных данных для обзорного картирования высотно-зональных категорий растительности и их вариантов в различных спектрах высотной поясности гор юга Сибири, а также мониторинга их динамики.

Работа выполняется на основе сопряженного анализа архива данных многолетних спутниковых съемок и материалов наземного обследования ключевых участков, выступающих в качестве основы для калибровки данных. Подходы, реализованные для исследуемых ключевых участков, предлагается использовать при картографировании всей зоны южной тайги Средней Сибири по спутниковым снимкам низкого и среднего пространственного разрешения.

Исходные данные и методика исследований

В работе использовались данные многоспектральной съемки низкого и среднего пространственного разрешения со спутников TERRA/Modis (250 м, 1000 м), NOAA/AVHRR (1000 м). Основное их достоинство, применительно к данной задаче – высокая обзорность и скорость обновления информации, что является необходимым условием для проведения мониторинга фенологического состояния экосистем. Обрабатывались данные в трех спектральных диапазонах TERRA/Modis: 0,620 – 0,670 мкм, 0,841 – 0,876 мкм (каналы 1 и 2, ориентированные на анализ вегетационных признаков) и 10,780 – 11,280 мкм (канал 31, фиксирующий радиометрическую температуру поверхности). Аналогичные, по сути, диапазоны представлены и в используемых данных 1, 2 и 5 каналов NOAA/AVHRR, имеющих рабочие диапазоны 0,58 – 0,68 мкм, 0,725 – 1,10 мкм, 11,5 – 12,5 мкм соответственно.

Использованные в работе спутниковые данные были подвергнуты предварительной обработке, включая навигационную коррекцию, коррекцию на угол Солнца, калибровку данных и преобразования в заданную географическую проекцию.

Для сопоставления, проверки и детализации результатов использовались композитные снимки среднего пространственного разрешения, полученные с аппарата SPOT-4 (20 м) в результате пространственного совмещения серии сцен в границах тестовых участков. Используемые каналы имеют рабочие диапазоны 0,50 – 0,59 мкм, 0,61 – 0,68 мкм и 1,58 – 1,75 мкм.

Архив спутниковых съемок на район исследований содержит данные с 1996 г. Наполнение архива осуществляется по мере приёма и обработки актуальных информативных

съемок в Центре коллективного пользования и Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Сформированный сегодня банк данных спутниковых изображений включает материалы NOAA/AVHRR, TERRA/Modis, SPOT-4 и позволяет проводить долгосрочный мониторинг состояния горных лесных экосистем, их функционирования до и после нарушений (рубок, ветровалов, пожаров и др.). На сегодняшний момент объем информации спутниковых снимков низкого разрешения с привязкой к району исследований составляет более 3 Гб и содержит данные о различных периодах вегетации. Кроме того, на каждый тестовый полигон имеются спутниковые съемки среднего пространственного разрешения, включая актуальные данные SPOT-4 за период вегетации 2009 года.

Для разработки алгоритма сопряженного анализа спутниковых и наземных данных были заложены тестовые участки на ключевых полигонах Восточного Саяна «Дивногорский», «Столбы» и Западного Саяна – полигон «Ермаковский» (рис. 1).

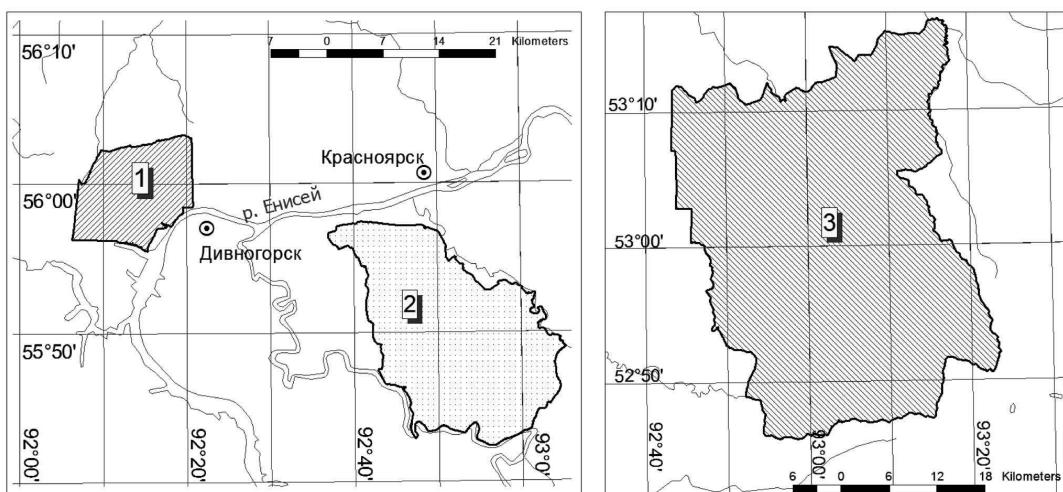


Рис. 1. Район исследований. Тестовые полигоны: 1) «Дивногорский», 2) «Столбы», 3) «Ермаковский»

На тестовых участках в приенисейской части Саян представлено все разнообразие хвойных лесообразователей и два высотно-поясных комплекса (ВПК) – подтаежный светлохвойный (сосново-мелколиственный) и таежно-черневой темнохвойный (пищтовый либо осиново-пищтовый), типичных для низкогорных ландшафтов с гумидным (влажным и избыточно влажным) климатом. Классы ВПК соответствуют лесорастительным поясам и объединяют одноименные ВПК разных округов Северной Алтай-Саянской провинции по сходству климата и потенциального состава лесообразователей. Ранее было выполнено разграничение ВПК в пределах спектра на каждом из полигонов как необходимый первый шаг к изучению сезонного функционирования высотно-зональных классов [1, 6].

На основе проведенных долговременных наземных обследований за период 1960 – 2009 гг. был сформирован банк данных по структуре и динамике растительного покрова

(база данных по флористическому составу, динамике сообществ, материалы лесоустройства и др.), которые позволяют выявить эколого-географические закономерности формирования разнообразия горных лесных экосистем и их локализацию в географическом пространстве.

База данных по динамике состава и фитоценотической структуры горных лесов реализована в СУБД Microsoft Access 2000 [7, 8]. В БД представлена общая характеристика объектов постоянных наблюдений с 1960 г. Ермаковского ОЭП Института леса СО РАН за разные сроки наблюдений, начиная с 1960 г. Часть данных хранится в специализированных программах, предназначенных для автоматизации обработки геоботанических данных: TurboVEG, IBIS.

ГИС для ключевого полигона «Ермаковский» содержит повыделочный оцифрованный план лесонасаждений, таксационные описания и цифровую векторную модель рельефа [9]. Обработка была проведена с использованием инструментальных средств ГИС-платформ.

По 7000 выделам из таксационных описаний были сняты 29 основных показателей. Выдел, являясь наименьшей пространственной единицей, содержит широкий набор атрибутивных данных в табличном виде по следующим показателям: индивидуальный идентификатор выдела; номер квартала; порядковый номер выдела; площадь выдела; формула состава древостоя первого и второго яруса и их полнота; средняя высота доминирующей породы первого и второго яруса, их возраст; поколение; главная древесная порода; серия типа леса; бонитет; формула состава подроста, его высота и количество на 1 га; видовой состав кустарников, травяного яруса; почвенные условия; пищевые растения; дополнительная информация (данные о пожарах, болотах, использование участка в качестве пастбища, сенокоса, вырубки или разведение лесных культур, принадлежность к особо-защитным территориям и др.).

Хранение, пополнение и извлечение флористических, геоботанических, лесоводственных материалов в специализированных базах данных и их визуализация с использованием инструментария ГИС облегчают все этапы исследования и расширяют круг задач, связанных с лесными экосистемами, их мониторингом, охраной и рациональным природопользованием. Оба вида данных необходимы для картирования ВПК и их структурных элементов: геокомплексов, типов лесорастительных условий, формаций и групп типов леса.

Мониторинг биоразнообразия горных лесных экосистем на южной окраине boreально-альной области Сибири представляет возможность выявления пограничных состояний лесных экосистем с динамичными характеристиками на переходе от тайги к лесостепи. Он важен не только как способ отслеживания изменений, но и для прогноза устойчивости

и трансформации лесного покрова в контексте протекающих изменений климата и окружающей среды. Особое значение придается региональному и локальному мониторингу, с акцентом на структуру лесного покрова внутри высотно-поясных комплексов (ВПК).

В ходе долговременного мониторинга растительного покрова на юге Сибири исследовано структурное разнообразие ВПК на уровне слагающих их видов, формаций и серий типов леса, а также на уровне эколого-ценотических групп (ЭЦГ) травяного покрова. Спектры ЭЦГ послужили надежным интегральным диагностическим признаком для выделения подтайги, черневого и таежного ВПК даже при сильной антропогенной нарушенности лесов и смене состава древостоя, поскольку отражают информацию в отношении экологии, структуры и особенностей сезонной ритмики ВПК [10].

При проведении классификации спутниковых снимков сигнатуры обучающих выборок были привязаны к данным наземных обследований. Такой же подход использовался при калибровке и валидации результатов классификации. Выделяемым классам присваивалась атрибутивная информация из банка данных наземных обследований.

Обсуждение результатов

Результаты классификации снимков TERRA/Modis, в пределах точности, определяемой пространственным разрешением, показали удовлетворительное совпадение с наземными данными и оказались близкими к результатам классификации снимков NOAA/AVHRR. На снимках полигона «Столбы» (Восточный Саян) были выделены подтаежный (с фрагментами лесостепи) и горно-таежный темнохвойный ВПК (рис. 2). Зональная статистика выделяемых классов варьирует в течение сезона вегетации. Кроме того, в силу ограничений, накладываемых разрешающей способностью съемки, ошибку вносят интразональные категории (темнохвойные насаждения в долинах рек), которые не выделяются в самостоятельный класс с удовлетворительной точностью.

Таблица 1. Средние значения взаимных перекрытий классов (рис. 2), %

Данные лесоустройства		Классы по TERRA/Modis	
		1	2
1	Подтаежно-лесостепной ВПК	67,5	32,5
2	Горно-таежный ВПК	19,7	80,3
3	Интразональные ельники	73,5	26,5

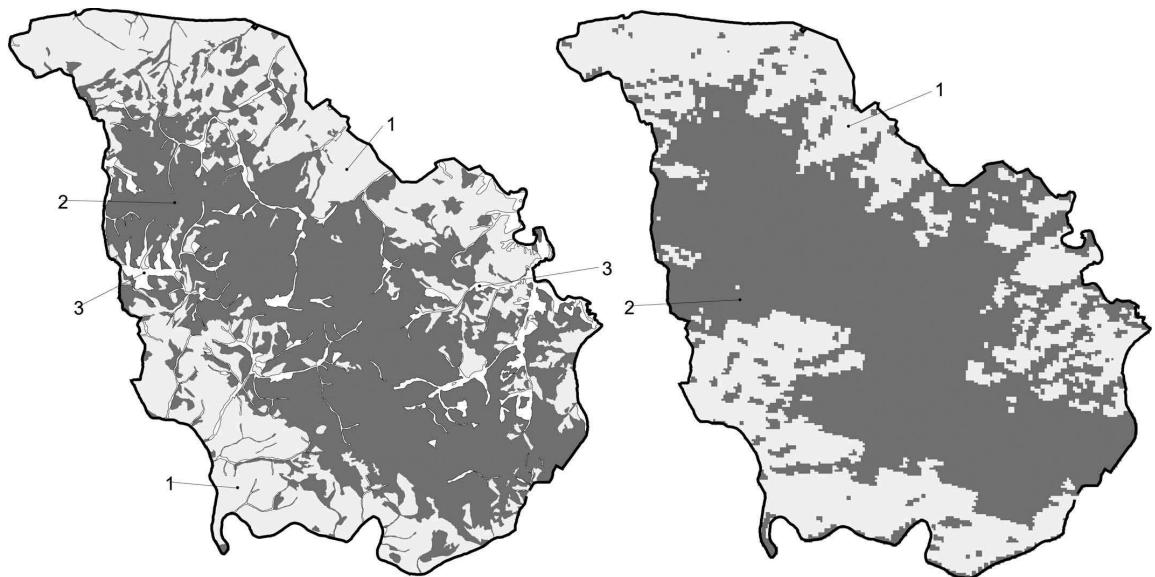


Рис. 2. Идентификация высотно-поясных комплексов (ВПК) на основе обработки материалов съемки TERRA/Modis. Полигон «Столбы». Слева – векторная карта по результатам лесоустройства, справа – результат классификации изображения с последующей бинаризацией. 1 – подтаежно-лесостепной ВПК, 2 – горнотаежный ВПК, 3 – интразональные категории (ельники вдоль рек)

Анализ зональной статистики результата классификации представлен в таблице 1. В течение сезона вегетации в буферной зоне между классами ВПК наблюдается взаимное перераспределение. Наибольшая степень вариации результатов классификации наблюдается в середине лета, в то время как съемки, проведенные весной и в конце лета, позволяют получить наиболее приемлемые оценки существующих классов ВПК. Класс интразональных темнохвойных насаждений в долинах рек, в силу причин, оговоренных выше, на результирующей картосхеме включен в подтаежный ВПК.

При анализе снимков TERRA/Modis на территорию полигона «Дивногорский» дополнительно внутри темнохвойного ВПК были идентифицированы площади с преобладанием кедра, вырубок и молодняков лиственных пород. Детализации подвергся и ВПК светлохвойно-мелколиственных травяных лесов (подтайги). По результатам проведенной классификации, согласующимся с данными инвентаризации, сосняки с примесью берескета составляют около 70%, а границы контуров близки к границам полигонов векторного слоя, сформированного по данным лесоустройства (рис. 3). Листопадные хвойные (лиственница) и мелколиственные (осина) в данном случае объединились и попали в категорию «безлесные территории», что можно отчасти объяснить сроком съемки до распускания хвои и листвы у этих древесных видов.

Таким образом, обработка съемки TERRA/Modis позволяет оценить соотношение групп формаций и некоторых более дробных категорий, а, кроме того, с обусловленной самим масштабом съемки точностью, выявлять границы зон тайги и подтайги и проводить дифференциацию внутри каждого из этих ВПК. Доступность этой информации в

различные сроки вегетации позволяет отслеживать кратковременную и долговременную динамику состояния лесного покрова, что имеет существенное значение для оценки катастрофических ситуаций. В частности, природная пожарная опасность светлохвойного травяного ВПК оценивается как высокая весной и осенью, тогда как в темнохвойном пихтовом ВПК она в целом низкая и лишь в годы с сильной и длительной засухой возрастает. Особого внимания в этом смысле заслуживает переходная полоса на высотах 400 – 450 м, где вероятность перехода беглых низовых пожаров в верховые наиболее высока.

На полигоне «Ермаковский» была обработана база данных наземных исследований, содержащая материалы лесоустройства 1970 г. Учитывая формационный состав, серии типов леса, абсолютную высоту и рельеф местности, были определены границы ВПК: подтаежного, черневого, горно-таежного, субальпийского (высокогорного) (рис. 4). Начиная с нижней границы темнохвойных лесов (350 – 500 м) и до верхней границы (1300 – 1500 м) в составе господствуют только две главных породы — кедр и пихта, тем не менее по всем биоклиматическим показателям и структуре выделяются перечисленные выше три ВПК, в которых проявляются особенности, свойственные избыточно-влажному климатическому сектору гор [3].

Как уже отмечалось, показатель обеспеченности теплом во многом определяет переход между высотными поясами. Один из возможных подходов для вычисления соответствующего показателя – анализ съемки в инфракрасном диапазоне спектра, в частности использование тепловых каналов TERRA/Modis и NOAA/AVHRR. Распределение температурного поля является одной из спектральных характеристик растительного покрова, представляющей интегральный вклад всех компонентов экосистемы (подстилающая поверхность, формационный состав) и их состояния (степени нарушенности, фенологическое состояние, степень сомкнутости верхнего полога). По нашим оценкам, в избыточно влажном климате смена высотных поясов по всему профилю коррелирует с градиентом температурного поля, построенного на основе теплового канала TERRA/Modis (31 канал). При этом пространственная локализация низкогорных ВПК (подтаежного и черневого) в большей части коррелирует с распределением температурного поля начала июня – это раннелетняя фаза сезона вегетации. Светлохвойно-мелколиственные травяные леса подтайги уже опережают в своем сезонном развитии пихтово-осиновые и кедрово-пихтовые крупнотравно-папоротниковые черневые леса на 4 – 5 дней, за счет более раннего таяния снега и лучшего прогревания. Разница значений радиометрической температуры поверхности, вдоль профиля протяженностью 40 км может составлять 10 – 15 °С, снижаясь к середине лета до 2 – 5 °С.

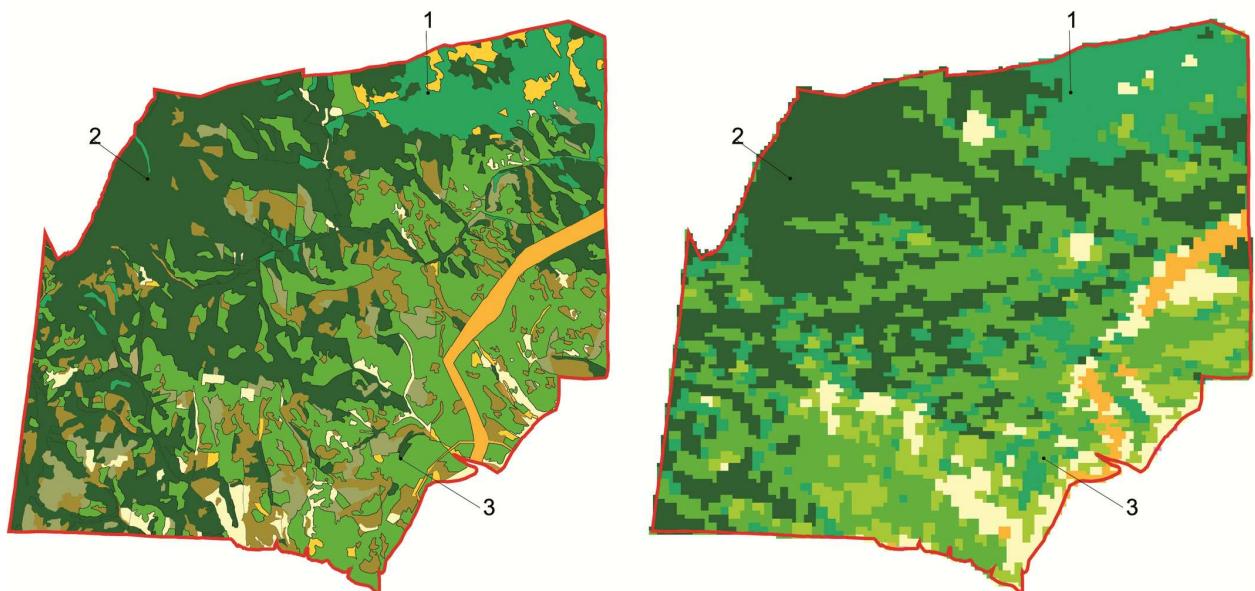


Рис. 3. Пример идентификации высотных поясов на основе обработки данных TERRA/Modis. Полигон «Дивногорский». Основные классы: 1 – таежно-черневой ВПК, участки с преобладанием кедра; 2 – таежно-черневой ВПК, территории с преобладанием темнохвойных (пихта; в долинах ель); 3 – подтаежный ВПК, территории с преобладанием сосны

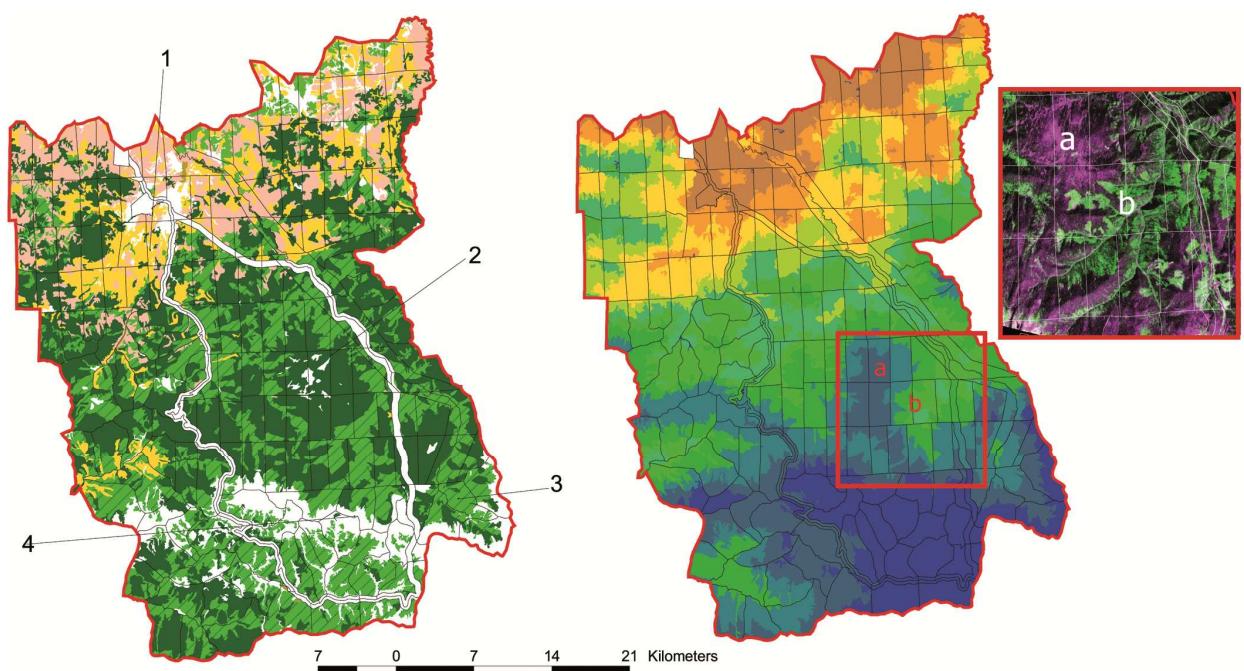


Рис. 4. Пример классификации спутниковых данных и анализ температурных градиентов. Полигон «Ермаковский». Слева – векторная карта по материалам лесоустройства, справа – картосхема по результатам обработки съемок в тепловом диапазоне.

*Условные обозначения: 1 – подтайга сосново-мелколиственная (*Pinus sylvestris*, *Betula pendula*); 2 – низкогорные черневые леса: мелколиственные (*Betula platyphilla*, *B. alba*, *Populus tremula*), пихтовые (*Abies sibirica*) и смешанные на месте старых вырубок в черневых кедровниках с пихтой (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*); 3 – среднегорные таежно-черневые (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica*); 4 – субальпийские редколесья (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*), луга, ерники, тундры.*

На выноске – фрагмент изображения SPOT-4. а – таежно-черневой ВПК; б – вырубки в таежно-черневых кедровниках, заросшие крупнотравьем и кустарниками

Отмечено, что высотно-поясная дифференциация может искажаться на температурных картах вследствие различного рода антропогенных нарушений, например, условно-сплошных вырубок на горных склонах. Так, выделенная на выноске (рис. 4) область имеет температурный режим, отличный от окружающей территории таежно-черневого ВПК (рис. 4 выноска, *a*), что обусловлено присутствием новых вырубок в таежно-черневых кедровниках, заросших крупнотравьем и кустарниками (рис. 4 выноска, *b*). Продолженные изменения не были учтены в векторных картографических слоях, созданных без учета ДДЗ последних лет. При этом данный участок детектируется как на материалах съемки среднего пространственного разрешения (фрагмент снимка SPOT-4 представлен на рисунке 4 на выноске), так и на съемках с низким разрешением, например, в тепловом диапазоне TERRA/Modis.

Высотный градиент температур от подтайги к высокогорному ВПК не остается постоянным, и в течение вегетационного сезона наблюдается его динамика. Она не всегда однозначна, как показывает сравнение ДДЗ. Данные наземных наблюдений, как следует ожидать, помогут установить эти закономерности на более массовом материале.

Основные выводы

По результатам многолетних исследований коллективом авторов был разработан алгоритм совместного использования спутниковых и наземных данных для картирования и мониторинга горных экосистем на юге Сибири. На южной границе бореальной области на основе признаков растительности и спектральных характеристик изображений выделены классы ВПК для Западного и Восточного Саяна: подтаежный – черневой (таежно-черневой) – горно-таежный – высокогорный, образующие высотные спектры в двух лесорастительных провинциях с разной степенью гумидности климата. Они представляют собой разные высотные лесорастительные пояса, которые можно и целесообразно отражать на картах и на планах насаждений в среднем масштабе (1:50 000 и мельче). Их практическое значение для многоцелевого природопользования очевидно. Показана необходимость использования теплового канала в целях мониторинга сезонной ритмики развития горных экосистем.

Спутниковые съемки в различных диапазонах спектра позволяют фиксировать текущие изменения в структуре растительного покрова горных территорий, связанные с антропогенными воздействиями и иными природными факторами. Такого рода изменения могут быть зафиксированы на снимках высокого разрешения, а также и при анализе данных низкого пространственного разрешения. Те и другие данные приобретают все боль-

шую ценность по мере их накопления в разные годы и фенологические сроки. Они незаменимы для мониторинга функционирования лесных экосистем и выявления их критических состояний, особенно вблизи южного предела их естественного произрастания.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №08-04-00-600-а и №08-04-00-613-а, № 09-04-98040-р_Сибирь_а и Проекта СО РАН №26 в рамках Программы РАН «Биологическое разнообразие».

Литература

1. *Назимова Д.И., Пономарев Е.И., Степанов Н.В., Федотова Е.В.* Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования // Лесоведение. 2005. № 1. С.12 – 18.
2. Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование / отв. ред. В.К. Шумный, Ю.И. Шокин, Н.А. Колчанов, А.М. Федоров; Институт цитологии и генетики. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 648 с.
3. *Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 216 с.
4. Типы лесов гор Южной Сибири / Под ред. Смагина В.Н. и др. Новосибирск: Наука, 1980. 333 с.
5. *Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Fedotova E.V.* Identification and mapping of altitudinal belt classes of land cover with use of NOAA/AVHRR imagery // Remote researches and mapping of geosystems structure and dynamics. Novosibirsk: SB RAS, 2000. P. 76 – 81.
6. *Коновалова М.Е., Дробущевская О.В.* Опыт применения аэро-космических методов исследования при изучении лесовосстановительного процесса в гумидных низкогорных ландшафтах Восточного Саяна // III Всерос. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоводстве и лесном хозяйстве», М., ВНИИЦлесресурс, 2002. С. 157 – 160.
7. *Исмаилова Д.М., Назимова Д.И.* База данных по постоянным объектам как основа мониторинга динамики фитоценотической структуры лесов // Формирование баз данных по биоразнообразию – опыт, проблемы, решения: мат. Междунар. научно-практ. конф. – Барнаул, 2009. С. 105 – 111.
8. *Гостева А.А., Ерунова М.Г., Садовский М.Г.* Пространственный анализ природных ресурсов особоохраняемых территорий с использованием ГИС // Совместный выпуск. Вычислительные технологии, т. 9, 2004. Вестник КазНУ, №3 (42), 2004. С.141-146.

9. Бабой С.Д., Гостева А.А., Исмаилова Д.М., Назимова Д.И., Степанов Н.В. Создание банка данных по разнообразию флоры и растительности черневых лесов Западного Саяна // Формирование баз данных по биоразнообразию – опыт, проблемы, решения: мат. Междунар. научно-практ. конф. – Барнаул, 2009. С. 38 – 43.
10. Молокова Н.И, Назимова Д.И. Эколого-биологические спектры горных лесов избыточно-влажного климата Саян. Ботанический сборник, в. 4, Красноярск, 1995. С. 43 – 51.

Satellite monitoring of mountain forest ecosystems on the southern margin of boreal zone

E.I. Ponomarev, D.M. Ismailova, D.I. Nazimova

*V.N.Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

New approach to use remote sensing data of low and moderate spatial resolution is suggested for forest cover mapping and for its seasonal monitoring. The researches of forest structure and dynamics on the southern margin of Boreal zone are conducted on three test sites of the Western and Eastern Sayan mountains since 1960. Satellite remote data for the territory (NOAA/AVHRR and TERRA/Modis imagery) are available for 1996 – 2009. After description of the data base the features of different forest zones and formations are shown in context of their identification and spectral characteristics changing during phenological seasons. Specification of mountain forest zones with different potential composition is important for forest management and monitoring on regional and local levels.

Keywords: mountain boreal forest, altitudinal zones, remote sensing, database, seasonal monitoring, spectral characteristics, Siberia