

УДК 574.9:630*181.351

РОЛЬ ВЫСОТНО-ПОЯСНОЙ ОСНОВЫ И ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМИ ЛЕСАМИ¹

© 2020 г. Д. И. Назимова^{а, *}, Е. И. Пономарев^{а, b}, М. Е. Коновалова^а

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

^бСибирский федеральный университет, просп. Свободный, 79, Красноярск, 660041 Россия

*E-mail: inpol@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.

После доработки 12.04.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

В работе обосновывается необходимость совершенствования принципов использования природной основы, предназначенной для экосистемного управления лесами в горных условиях, используя для этого все накопленные знания, региональные базы данных и новые возможности дистанционных методов. На примере гор Алтае-Саянского экорегиона приводятся результаты использования спектральных признаков растительности с привлечением теплового диапазона при анализе высотно-поясной дифференциации лесного покрова. Так, в приенисейской части Саян отчетливо проявляются лесостепной, подтаежный светлохвойно-мелколиственный, горно-черновой темнохвойный, горно-таежный (с вариантами по составу лесообразователей) и подгольцово-субальпийский классы высотно-поясных комплексов (ВПК). Для каждого из них должны применяться свои системы ведения лесного хозяйства, связанные с природными особенностями лесов и их целевым назначением. Актуальной задачей для горного лесоводства и в целом многоцелевого лесопользования является совершенствование эколого-географической основы и ее картографическое воплощение в виде среднemasштабных карт с отражением не только формационного состава лесного покрова, но и высотно-поясных классов экосистем. Современные спутниковые системы дистанционного зондирования в сочетании с ГИС-технологиями открывают возможности для совершенствования методов инвентаризации, мониторинга, изучения географии лесного покрова, меняющейся под воздействием внешних факторов. Это позволяет перейти к внедрению в практику лесопользования качественной природной основы, востребованной на всех уровнях лесного планирования — от планов освоения лесных участков до лесных планов субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: горные леса, классификация лесного покрова, дистанционные методы, высотно-поясные комплексы типов леса, тепловые каналы Terra/MODIS, сезонное функционирование.

DOI: 10.31857/S0024114820010106

С появлением в Сибири (в г. Красноярске) академического института лесной тематики (Института леса и древесины СО АН СССР) перед коллективом были поставлены крупные исследовательские задачи, связанные с лесорастительным районированием Сибири и созданием природной основы для организации и ведения лесного хозяйства. Академик А.Б. Жуков с 1960 г. более 15 лет руководил крупным научным коллективом и вместе с ним обосновал и разработал новую ветвь отечественной науки о лесе — направление горного лесоводства. Для Сибири разработка принципов ведения лесного хозяйства на зонально-типологической (в горах — высотно-поясной) основе стала одной из главных тем многолетних

комплексных исследований, а создание эколого-географического “каркаса” для экосистемного управления лесами — важной перспективой внедрения в практику всех научных разработок института.

Александр Сергеевич Исаев стал непосредственным преемником академика А.Б. Жукова с 1977 г. и возглавлял Институт леса СО АН СССР до 1988 г. Под его руководством в Сибири велись широкомасштабные комплексные исследования кедровых лесов (Кедровые леса ..., 1985), лесов бассейна оз. Байкал, продолжено внедрение в практику эколого-географических принципов организации и ведения лесного хозяйства в бассейне оз. Байкал (Жуков, Поликарпов, 1973). При нем получили развитие методы дистанционного зондирования в применении к картографированию и мониторингу лесного покрова (Киреев,

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН № 0356-2019-0024 и при финансовой поддержке РФФИ (18-05-00781 А).

Рубцов, 1976; Исаев, 1979), идеи лесоинвентаризации на ландшафтных принципах и экосистемного управления лесами (Калашников и др., 1987; Исаев, Коровин, 2001; Региональные проблемы ..., 2007). Он много лет руководил программой “Применение методов дистанционного зондирования Земли”, которая позволяет многократно снизить трудоемкость мониторинга лесных экосистем в малодоступных регионах Сибири и повысить объективность оценки их состояния (Разнообразия и динамика ..., 2012). А.С. Исаев был сторонником эколого-географического подхода к классификации лесных территорий и регионально-географического принципа управления лесным хозяйством. Работы этого направления продолжают в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН специалистами разного профиля. Знаковым изданием, вероятно, можно считать коллективную монографию “Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами” под редакцией чл.-корр. АН СССР Александра Сергеевича Исаева (1979). В ней уже тогда нашел отражение широчайший спектр задач и перспектив, которые открываются с привлечением спутниковых данных для специалистов различного профиля – географов, лесоводов, почвоведов, пирологов, болотоведов, геоботаников.

В данной работе обосновывается необходимость совершенствования принципов использования природной основы, предназначенной для экосистемного управления лесами в горных условиях с использованием региональных баз данных и новых возможностей дистанционных методов.

Ранее было показано, что универсальной закономерностью пространственной дифференциации лесного покрова в горах является высотная поясность, и ее необходимо учитывать в горном лесоводстве при любых подходах к ведению хозяйства на природной основе (Поликарпов и др., 1986).

Одна из конкретных задач в данном исследовании состоит в демонстрации на примере гор Алтае-Саянского экорегиона первых результатов использования спектральных признаков растительности с привлечением теплового диапазона при анализе высотно-поясной дифференциации лесного покрова и разработке природной основы для многоцелевого лесопользования.

Современные спутниковые системы в сочетании с ГИС-технологиями позволяют реализовать эффективный метод инвентаризации, картирования и долговременного мониторинга лесов. С учетом масштабов влияния антропогенного и природного факторов, проявляющихся в современных условиях за сравнительно небольшие периоды времени, только использование периодической спутниковой съемки в широком спектральном диапазоне позволяет проводить эффективный мониторинг функционирования и динамики при-

родных комплексов и, в частности, горных территорий юга Сибири (Барталев и др., 2015; Ponomarev, Kharuk, 2016; Ponomarev et al., 2016).

Стандартные подходы к использованию спутниковой информации при дешифрировании растительности основаны, как правило, на спектральных различиях в вегетационных каналах спутниковых радиометров (Polezhaev, 2009; Барталев и др., 2011; Kukavskaya et al., 2012; Lu et al., 2017). Такой подход имеет ограничения, связанные с определенной трудностью выделения близких по спектральным свойствам категорий и классов растительности. Таким образом, результаты спутникового дешифрирования, как правило, сопровождаются атрибутивным описанием широкого спектра растительности для каждого из выделяемых классов. Для повышения эффективности спутникового дешифрирования и точности результатов, очевидно, требуется расширение используемого пространства признаков и связанное с этим расширение используемого спектрального диапазона.

Величины обеспеченности теплом и влагой, как показано нашими предыдущими исследованиями (Назимова и др., 2005), во многом определяют переход между высотными поясами. Один из возможных подходов для вычисления соответствующего температурного показателя – анализ съемки в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, в частности, использование тепловых каналов Terra/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Распределение температурного поля является одной из спектральных характеристик растительного покрова, представляющей интегральный вклад всех компонентов экосистемы (подстилающая поверхность, формационный состав) и их состояния (степень нарушенности, фенологическое состояние, степень сомкнутости верхнего полога). Использование ИК-диапазона возможно в самом широком аспекте исследования растительного покрова, подстилки и сукцессионных процессов (Пономарев, Пономарева, 2018; Пономарева и др., 2018).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объектом исследования являлись горные лесные территории приенисейской части Алтае-Саянского экорегиона.

Район исследований расположен в центре Евразии и Алтае-Саянской горной области (51°–56° с.ш., 90°–95° в.д.). Удаленность от океанов формирует на данной территории в целом континентальный климат. Однако особенности климата во многом определяются горным рельефом. Направление основных хребтов Алтае-Саянской горной области на пути переноса воздушных масс обуславливает дополнительное увлажнение севе-

ро-западных макросклонов задерживаемыми атлантическими воздушными массами. Подветренные южные и юго-восточные макросклоны увлажнены значительно меньше. Зависимость от условий увлажнения является региональной особенностью высотной зональности Саян. Как следствие выделяются циклонические и континентальные варианты спектров высотной зональности, которые в свою очередь разделяются на 4 биоклиматических сектора, или географо-климатические фации (Поликарпов и др., 1986): континентальные умеренно сухой (семиаридный) и умеренно влажный (семигумидный); циклонические влажный (гумидный) и избыточно влажный (гипергумидный) (рис. 1). Под влиянием характерных для каждого биоклиматического сектора условий в каждом из них формируются особые спектры высотно-поясных комплексов (ВПК). Кроме того, как и во всех горных странах, мозаика климатических условий усложняется в связи с температурными инверсиями, вертикальными градиентами осадков, горно-долинными, склоновыми и компенсационными ветрами.

Наземные исследования, проводимые с 1960-х в горных районах Алтае-Саянского экорегиона, нашли свое отражение в ряде публикаций (Типы лесов ..., 1980; Кедровые леса ..., 1985; и др.). Результаты полевых исследований и материалы лесоустройства 1960–1980-х гг. составили основу региональных баз данных. На основании анализа этого массового материала для многих районов Южной Сибири выявлено разнообразие лесных экосистем зонального ряда, к которым относятся и высотно-поясные экосистемы, или ВПК. Классы и спектры ВПК систематизированы в виде таблиц с характеристикой их свойств, тенденций восстановительных смен, а также диагностических признаков, позволяющих идентифицировать ВПК в природе. Для гор Южной Сибири уточнено лесорастительное районирование и завершена классификация ВПК, проведенная с помощью многомерной климатической ординации природных категорий высотно-зонального ранга (Поликарпов и др., 1986). Уточнено положение классов черневых и подтаежных лесов в горах и на равнинах юга Сибири, их климатическая обусловленность (Назимова и др., 2005).

Для некоторых аспектов данного исследования привлекались также результаты многолетнего спутникового мониторинга. В качестве исходных данных использованы ретроспективные материалы многоспектральной спутниковой съемки Terra/MODIS с пространственным разрешением 250 и 1000 м за период 2002–2017 гг. Используются технические возможности приемных комплексов Центра коллективного пользования и Единого регионального центра дистанционного зондирования ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. Материалы среднего пространственного разрешения (15–30 м)

Landsat/ETM/OLI (Enhanced Thematic Mapper/Operational Land Imager) использовались для сверки и коррекции площадных и геометрических параметров нарушенных участков. Высокая периодичность обновления спутниковых данных позволяет восстанавливать динамику растительности, природных зон и высотных поясов на основе варьирования спектральных характеристик изучаемых объектов. Данный подход эффективен при анализе характерных особенностей развития растительности за период вегетации или в отдельные сроки фенологических циклов (Nazimova et al., 2000; Bartalev, Belward, 2002; и др.).

Мониторинг динамики спектральных признаков выполнялся на основе стандартных продуктов MODIS уровня обработки L2G и L3 (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis). Калиброванные данные об альbedo поверхности в диапазонах $\lambda_1 = 0.620\text{--}0.670$ мкм (канал 1 MODIS) и $\lambda_2 = 0.841\text{--}0.876$ мкм (канал 2) были получены на основе стандартного продукта MOD09GQ (Vermote, Wolfe, 2015). Ежедневные попиксельные данные о температуре поверхности в диапазоне $\lambda_3 = 10.780\text{--}11.280$ мкм (каналы 31, 32) вычислялись с использованием продукта MOD11A1 (Wan et al., 2015). Оба стандартных продукта определены для безоблачных условий (clear sky) на поверхности Земли.

Результаты обработки спутниковой информации за различные временные отрезки усреднялись по декадам вегетационного периода (май–сентябрь), что позволяет отобразить динамику спектральных признаков классов растительности в соответствии с фенологической цикличностью.

В границах четырех исследуемых полигонов (рис. 1) экспертно выбирали характерные участки на основе сопряженного ГИС-анализа цифровой модели рельефа (масштаб 1 : 5000000) и полигонального слоя природно-климатических фаций (масштаб 1 : 5000000), для которых восстанавливали временные ряды значений спектральных характеристик. Таким образом, были выделены полигоны, представляющие основные категории ландшафтов и элементов рельефа. Усреднения проводились по данным, фиксируемыми в не менее чем 200 пикселях изображений, принадлежащих нескольким участкам в пределах каждой из выделяемых высотных зон. Предварительный анализ позволил отнести полигоны к зоне черневых лесов, подтаежной зоне Саян, высокогорьям, переходному поясу степи–лесостепи, предгорьям и высотному поясу Кузнецкого Алатау, зоне степи и территории межгорных котловин.

Значения альbedo в диапазонах λ_1 , λ_2 использованы для анализа рядов вегетационного индекса NDVI. Данные теплового диапазона λ_3 позволили оценить вариативность теплового режима рассматриваемых категорий поверхности.

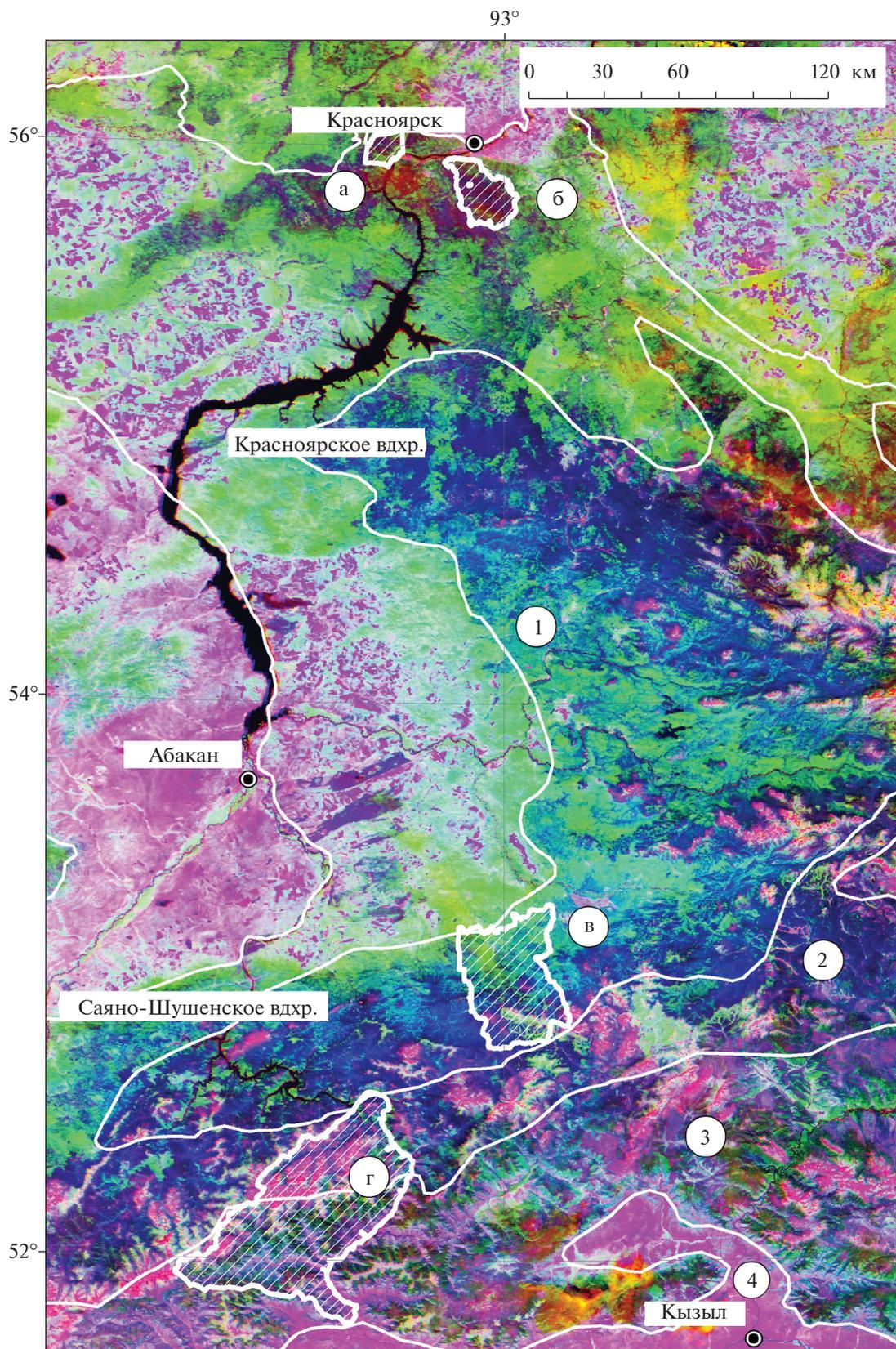


Рис. 1. Синтезированное трехканальное (канал 1: $\lambda_1 = 0.620\text{--}0.670$ мкм, канал 2: $\lambda_2 = 0.841\text{--}0.876$ мкм, канал 3: $\lambda_{31} = 10.780\text{--}11.280$ мкм) изображение Terra/MODIS (июль, 2017 г.) района исследований. Тестовые полигоны: (а) “Дивногорский”, (б) “Столбы”, (в) “Ермаковский”, (г) “Саяно-Шушенский”. Географо-климатические фации горных лесов: 1 – избыточно влажная, 2 – влажная, 3 – умеренно влажная, 4 – умеренно сухая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт сопряженного анализа наземной информации и материалов спутникового мониторинга позволяет говорить об эффективности именно такого подхода, построенного на взаимном дополнении, уточнении и экстраполяции результатов как натуральных экспериментов, так и материалов математической обработки космоинформации. Для всех отработанных тестовых полигонов (рис. 1, полигоны “а”, “б”, “в” и “г”) результаты классификации снимков Terra/MODIS в пределах точности, определяемой пространственным разрешением, показали удовлетворительное совпадение с наземными данными и материалами лесоустройства прошлых лет. Предварительная неуправляемая классификация выполнялась с использованием алгоритма ISODATA, результаты которой были сопоставлены с высотными категориями в границах полигонов для описания соответствующего спектра растительности. На последующих этапах, сопряженно с обращением к данным наземного обследования, формировалась обучающая выборка и характерные спектральные сигнатуры, отражающие характеристики уже зафиксированных высотных комплексов и классов растительности в различные фенологические сезоны.

Так, на примере полигона “Столбы” (Восточный Саян) (рис. 1, полигон “б”) показана успешная классификация подтаежного (с фрагментами лесостепи) и горно-таежного темнохвойного ВПК. Ранее было показано, что зональная статистика выделяемых классов варьирует в течение сезона вегетации (Дробушевская, Пономарев, 2006). Кроме того, в силу ограничений, накладываемых разрешающей способностью съемки, ошибку вносят интразональные категории (например, темнохвойные насаждения, долинские комплексы малых рек), которые не выделяются в самостоятельный класс с удовлетворительной точностью. Наибольшая степень вариации результатов классификации наблюдается при максимумах вегетационного индекса в середине лета, в то время как съемка, проведенная весной и в конце лета, позволяет получить наиболее приемлемые оценки существующих классов ВПК.

При дальнейшем анализе с привлечением экспертных знаний дополнительно внутри темнохвойного ВПК были идентифицированы площади с преобладанием кедра, вырубок и молодняков лиственных пород (рис. 1, полигон “а” – “Дивногорский”).

Таким образом, показано, что высотные лесорастительные пояса проявляются не только в сильно расчлененном горном рельефе на юге Сибири, но даже в менее выраженном низкогорном рельефе, на территории отдельного небольшого лесничества. Например, территории полигонов “Дивногорский” и “заповедник Столбы”, имею-

щие площадь всего 20 и 50 тыс. га, достаточно ясно дифференцированы на два пояса, сильно различающиеся по составу коренных насаждений и направлению восстановительных сукцессионных рядов (Коновалова, 2004; Konovalova, Drobushenskaya, 2013). Нижний пояс – светлохвойный и мелколиственный, верхний – темнохвойный (пихтовый). В долинах всюду доминируют интразональные ельники, что нередко затушевывает четкую картину ландшафтно-климатической дифференциации на два пояса. Значение этой границы, проходящей в каждом лесхозе на горном юге Красноярского края, трудно переоценить: она имеет ранг зональной границы (т.е. самый высокий ранг) и отделяет зону устойчивого произрастания кедра и пихты от зоны их неустойчивого существования, обусловленной природными и антропогенными пожарами, засухами и эпифитотиями (Кедровые леса ..., 1985).

При вариации сроков проведения съемки, как правило, детализации подвергается и пояс подтайги (ВПК светлохвойно-мелколиственных травяных лесов). Так, листопадные хвойные (лиственница) и мелколиственные (осина) до распускания хвои и листвы у этих древесных видов (ранняя весна) могут быть отнесены к категории «безлесные территории», а сосна, береза и долинные ельники проявятся при достаточной площади выделов. Это позволяет разграничить ареалы осины и березы (и других лиственных пород деревьев), используя вслед за этим сроком другие более поздние даты с изображением осинников с распутившейся листвой. Однако этот факт легко учесть при проведении классификации на основе сведений о динамике и сроках фенологических фаз выделяемых категорий растительного покрова.

В целом на основе съемки Terra/MODIS с заданной степенью точности можно оценивать соотношение групп формаций и некоторых более дробных категорий, выявлять границы природных зон в относительно ненарушенных лесных массивах и проводить дифференциацию растительности внутри ВПК. Доступность этой информации в различные сроки вегетации позволяет отслеживать кратковременную и долговременную динамику состояния лесного покрова.

В избыточно-влажном климатическом секторе Саян, куда относится полигон “Танзыбей” (рис. 1, полигон “в”), смена высотных поясов по всему профилю коррелирует с градиентом температурного поля, построенного на основе съемки Terra/MODIS в тепловом диапазоне (канал 31 радиометра MODIS). При этом пространственная локализация низкогорных ВПК (подтаежного и черневого) большей частью коррелирует с распределением температурного поля начала июня (раннелетняя фаза сезона вегетации). Светлохвойно-мелколиственные разнотравные леса подтайги

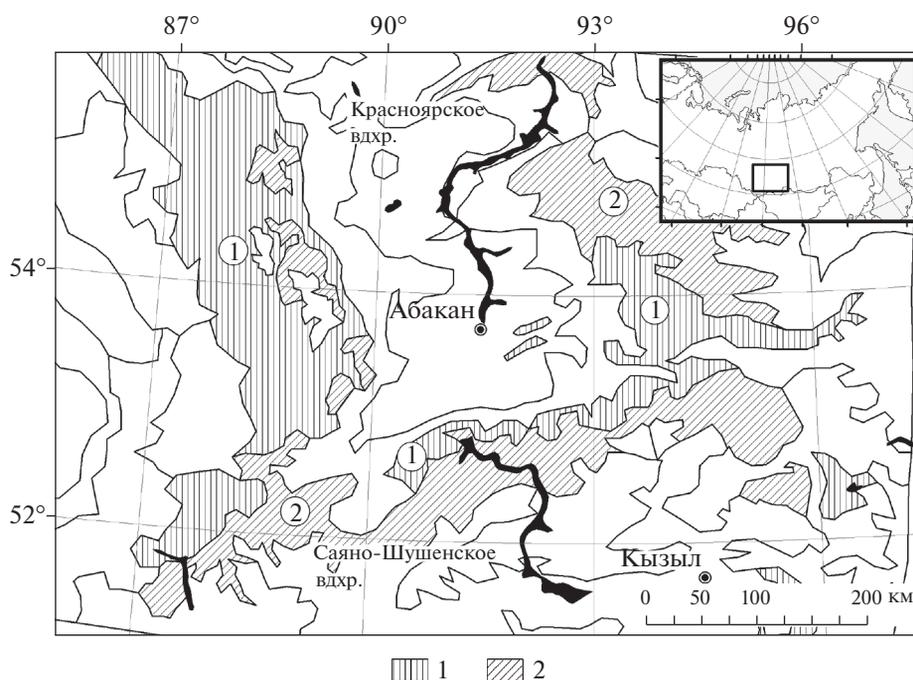


Рис. 2. Результат классификации спутниковых данных с выделением поясов подтайги (1) и черновой тайги (2). Масштаб векторной карты 1 : 3000000.

уже опережают в своем сезонном развитии пихтово-осиновые и кедрово-пихтовые крупнотравно-папоротниковые черневые 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°C, снижаясь к середине лета до 2–5°C.

В целом высотный градиент радиометрической температуры в зоне перехода от подтайги к высокогорному субальпийскому ВПК не остается постоянным, и в течение вегетационного сезона наблюдается его динамика. Она не всегда однозначна, как показывает сравнение материалов спутниковой съемки в разные периоды. Данные наземных наблюдений, несомненно, необходимы при последующем обобщении таких закономерностей.

Классификация ВПК на полигоне “Танзыбей” выполнена на основе обучающей выборки (методом максимальных дистанций), “привязанной” к результатам наземного описания растительности тестовых полигонов. Серия обследованных участков с привязкой к координатам, типам леса и высотным категориям была использована для последующего выделения обучающих сигнатур на спутниковых снимках. В рамках поставленной задачи наиболее важно было убедиться в возможности разделить такие смежные и близкие в спектральном смысле категории, как подтайга и черневая тайга. Необходимо отметить, что отличие

этих классов возможно с привлечением дополнительных данных, таких как уровень и вариация в сезоне теплообеспеченности, режима увлажнения и иных характеристик, не фиксируемых в “вегетационных” каналах съемки. Наш опыт показывает, что точность решения данной конкретной задачи практически не зависит от выбора метода математической обработки снимка в силу указанных причин. Более того, в зависимости от времени съемки наблюдалось значительное (до 25–30%) перераспределение между выделяемыми классами. Таким образом, решающее значение имеет именно обеспеченность материалами подспутниковых обследований, использующихся как дополнительный инструмент экспертной оценки результата. Результат предварительной классификации пояса подтайги (на площади 5.46 млн га) и черневой тайги (6.21 млн га) для юга Сибири продемонстрирован на рис. 2. Профиль кривой динамики вегетационного индекса на высотном градиенте (рис. 3) фактически не меняется в течение сезона (рис. 4). Относительно стабильные значения показателя обеспечиваются в поясе высот 400–1000 м как в начале сезона вегетации (рис. 4б), так и в середине лета (рис. 4г). Существенно большая вариабельность проявляется в значениях относительного (по сравнению со значениями максимума температуры для данного периода) показателя температуры. Различия в течение сезона принципиально меняют профиль высотного градиента температуры (рис. 4а, 4в). Таким образом, отличии

Таблица 1. Разнообразие ВПК на примере горных лесничеств и ООПТ юга Красноярского края

| Лесничества и ООПТ | Площадь, га | ВПК в пределах лесничества |
|-------------------------|-------------|--|
| Ермаковское | 373483 | 1. Подтаежный 2. Черневой 3. Горно-таежный 4. Подгольцово-субальпийский |
| Ирбейское | 904916 | 1. Лесостепной 2. Подтаежный 3. Таежно-черневой 4. Горно-таежный 5. Субальпийско-подгольцовый |
| Курагинское | 1282634 | 1. Лесостепной 2. Подтаежный 3. Таежно-черневой 4. Горно-таежный 5. Субальпийско-подгольцовый |
| Шушенское | 761419 | 1. Лесостепной 2. Подтаежный 3. Черневой 4. Горно-таежный 5. Субальпийско-подгольцовый |
| Заповедник “Столбы” | 47154 | 1. Подтаежный мелколиственно-светлохвойный 2. Горно-таежный темнохвойный |
| Природный парк “Ергаки” | 342873 | 1. Лесостепной 2. Подтаежный 3. Горно-таежный светлохвойный 4. Горно-таежный темнохвойный 5. Подгольцово-субальпийский |

тельные признаки, основанные на температурных режимах, в большей степени работают в условиях неравномерного прогрева территории по высотным поясам в начале вегетационного сезона.

Регулярные спутниковые съемки позволяют проследить изменения спектральных характеристик природных зон и высотных поясов, проявляющиеся как в пространстве, так и во времени. При этом эффективность выявления и обзорного картографирования близких в спектральном смысле категории, таких, например, как смежные классы ВПК, может быть повышена с привлечением дополнительных данных наземного обследования и/или съемки в более широком спектральном диапазоне. В нашем случае были привлечены подекадно усредненные данные теплообеспеченности (на основе восстановления температурных полей по данным канала 31 Terra/MODIS), режима увлажнения (по материалам метеостанций), высотного зонирования территории, а также доступный набор результатов натуральных обследований. Если говорить о точности результата, необходимо учитывать отсутствие “эталонных” карт. Это вполне объяснимо в связи со сложностью однозначной интерпретации исследуемых катего-

рий, которая во множестве публикаций дается только на качественном уровне или в обзорном смысле. Задача авторов данной статьи заключалась, в том числе, в опробировании новых подходов к выявлению разнообразия ВПК с повышением роли инструментальных методов перед практикой экспертного описания.

Для большинства таежных горных лесничеств или ООПТ юга Красноярского края выявляется смена 4–5 ВПК (табл. 1). ВПК, представленные на территориях большинства горных лесничеств, являются экосистемами крупного ранга, с определенным диапазоном климатических параметров, обуславливающим природно-ресурсный потенциал лесов. Функциональными звеньями систем ВПК являются слагающие их коренные и производные *формации, серии типов леса, типы леса*, а диагностическим признаком – состав экоморф нижних ярусов. Для ВПК могут быть определены приуроченность к орографии и литологии конкретного ландшафта, количественные показатели повторяемости пожаров, сроки таяния снега и фазы сезонного развития растительности и отдельных видов биоресурсов (ягодников, заготавливаемых трав и т.д.). И главное – разгра-

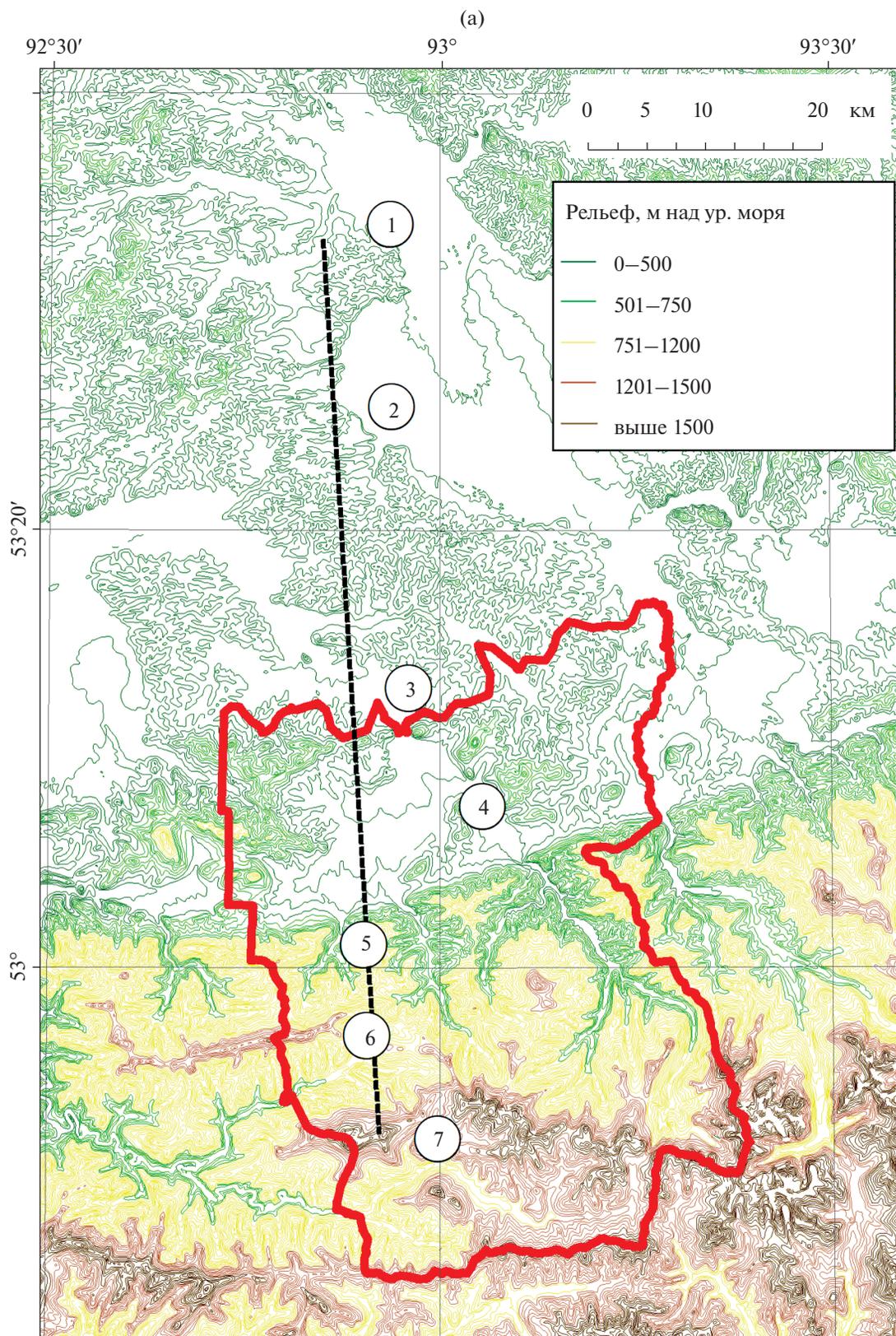


Рис. 3. Полигон “Танзыбей” и трансекта высотного градиента на изолиниях высот (а) и на снимке Terra/MOIDS (б). 1, 2 – лесостепь, 3 – подтайга, 4 – черневые леса, 5 – черневая тайга, 6 – среднегорная темнохвойная тайга, 7 – субальпийские редколесья.

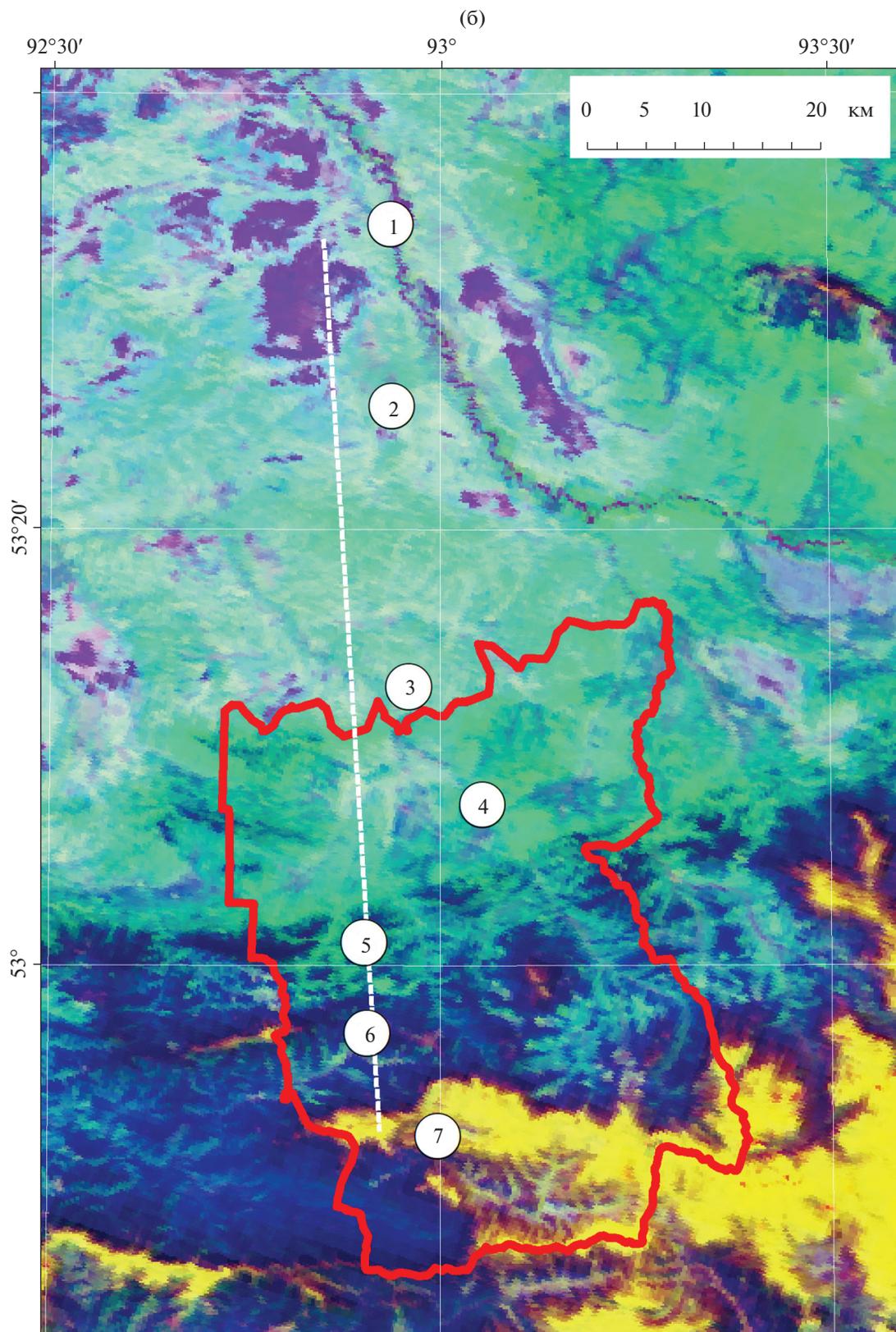


Рис. 3. Окончание

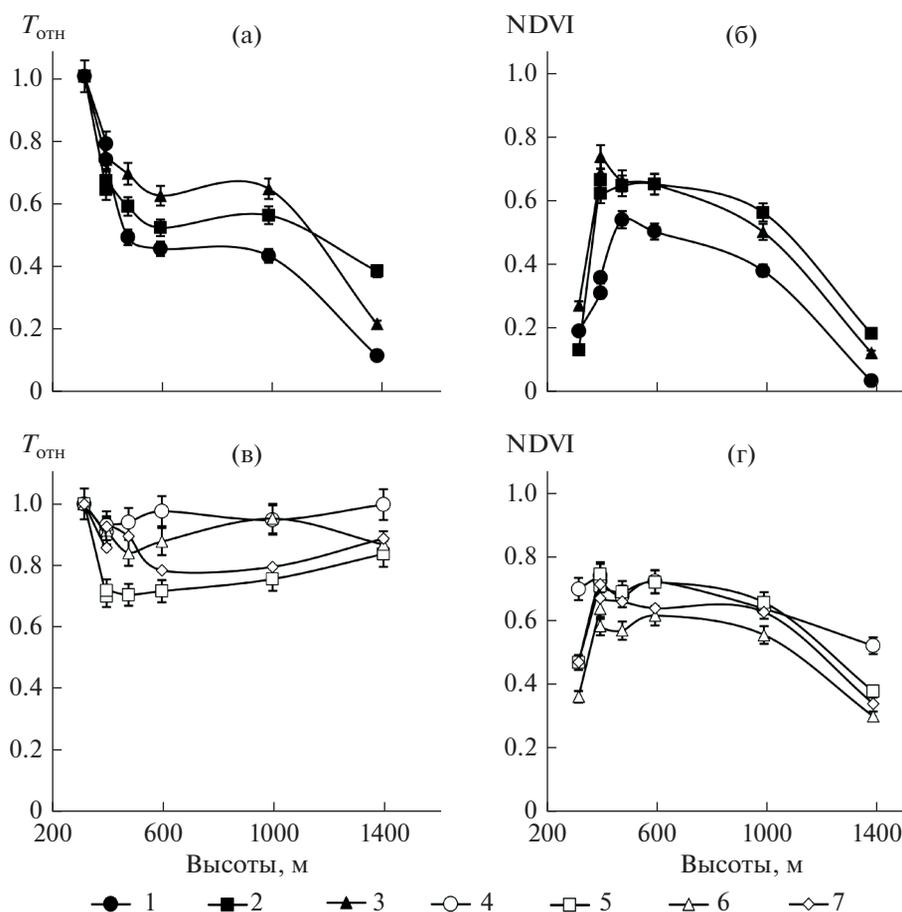


Рис. 4. Вариация относительного показателя температуры и NDVI на высотном градиенте в течение сезона вегетации (полигон “Танзыбей”). Время проведения измерений: а, б – весенний период, в, г – вторая половина лета. Усреднение по фенологическим периодам: 1 – первая декада мая, 2 – третья декада мая, 3 – первая декада июня, 4 – первая декада июля, 5 – третья декада июля, 6 – первая декада августа, 7 – третья декада августа.

ничены направления систем хозяйства и меры и объемы лесовосстановительных работ, в связи с естественным ходом сукцессий (Кедровые леса ..., 1985; Руководство по организации ..., 1990).

В задаче многоцелевого лесопользования данная дифференциация на ВПК является важнейшим базовым элементом, определяющим разработку и планирование многоцелевого природопользования, хозяйственного освоения, охраны, защиты, воспроизводства и сохранения биоразнообразия лесных экосистем с учетом природных и антропогенных факторов риска (табл. 2). Очевидно, что для каждого из ВПК требуются соответствующие их природе меры по охране от пожаров, лесовосстановлению, использованию биоресурсов и т.д. Таковы особенности структуры лесного покрова в горах в отличие от равнин, где смена широтных зон происходит на пространственных градиентах, на два-три порядка превышающих ширину высотных поясов и их вариантов.

Более детальную оценку эколого-ресурсного потенциала (внутри ВПК) необходимо проводить

с учетом районирования и картографирования типологической структуры лесов разного уровня (от типов и групп типов леса, их комплексов разного ранга до ВПК и их классов – как экосистем более высокого ранга иерархии). Такая многоуровневая эколого-географическая основа необходима уже сейчас для районов интенсивного ведения лесного хозяйства, лесов высокой природоохранной ценности и экологической значимости. С учетом различной экологической роли и многообразных хозяйственных функций горных лесов каждому классу ВПК может быть предложена соответствующая система ведения лесного хозяйства (Поликарпов и др., 1986). Для подтаежных и горно-лесостепных ВПК приоритетными являются почвозащитные и противозерозийные функции. В горно-черневых ВПК с учетом их высокой потенциальной продуктивности рекомендуется ведение интенсивного хозяйства с акцентом на плантационное выращивание кедра. Для разных вариантов горно-таежных ВПК с преимущественно эксплуатационно-защитной системой хозяйственно-

Таблица 2. Факторы риска и варианты лесовосстановления в разных классах ВПК приенисейской части Саян

| Класс ВПК, климатические характеристики | Основные дестабилизирующие факторы и продолжительность пожароопасного сезона | Направления естественной динамики после нарушений |
|---|--|--|
| Лесостепной, сумма активных температур 2000–1300°, коэффициент увлажнения 0.5–0.9, годовая сумма осадков 400–550 мм | Пожары, ветровая эрозия, засуха, эпифитотии, антропогенные вмешательства; 60–130 дней | Смены на степи, луга, заросли кустарников |
| Светлохвойно-мелколиственный подтаежный, сумма активных температур 1900–1000°, коэффициент увлажнения 0.9–1.2; 450–650 мм | Пожары, эпифитотии, рубки, антропогенные вмешательства; 30–60 дней | Смены на длительно производные лиственные насаждения и луга |
| Горно-черневой сумма активных температур 1650–11500°, коэффициент увлажнения 1.2–2.8, годовая сумма осадков 560–1200 мм | Рубки, ветровалы, буреломы, водная эрозия, эпифитотии; 5–20 дней | Разрастание кустарников, крупнотравья. Смены на длительно производные осинники и пихтово-лиственные леса |
| Горно-таежный сумма активных температур 1300–600°, коэффициент увлажнения 1.2–3.0, годовая сумма осадков 500–1300 мм | Рубки, пожары, ветровалы, буреломы, водная эрозия; <30 дней | Короткопроизводные березняки, сосняки и осинники |
| Подгольцово-субальпийский сумма активных температур 700–250°, коэффициент увлажнения 2.8–4.2, годовая сумма осадков 800–1500 мм | Водная эрозия, снеголомы, лавины, солифлюкция, сезонный выпас скота, неорганизованный туризм и рекреация; <20 дней | Образование курумов, смены на луга, заросли кустарников, ерников |

вания предлагаются региональные комплексы, учитывающие специфику типологической структуры и направленности лесообразовательного процесса. Особого внимания заслуживают высокогорные ВПК (субальпийские, подгольцовые леса и редколесья). Им отводится роль водно-охранно-защитных, водосборно-водорегулирующих экосистем, несущих повышенные гидрологические нагрузки и выполняющих максимальную стоко- и климаторегулирующую роль. Актуальной задачей для горного лесоводства и в целом многоцелевого лесопользования является совершенствование эколого-географической основы и ее картографическое воплощение в виде среднемасштабных карт с отражением не только формационного состава лесного покрова, но и высотно-поясных классов экосистем. Дальнейшая детализация карт ВПК лесного покрова может строиться не по одной, а по нескольким схемам, в зависимости от целей и задач природопользования и планирования.

Для горного юга Красноярского края, относящегося к бассейну р. Енисей и определяющего во многом его режим далеко за пределами горной системы Саян, проблемы организации многоцелевого природопользования на высотно-поясной основе имеют непосредственное практическое значение и могут быть решены в короткие сроки с использованием последних научных достижений. И лишь нестабильность лесной отрасли ме-

шает внедрению в жизнь научных основ многоцелевого природопользования на принципиально новой эколого-географической основе.

Заключение. ВПК, их классы и спектры, представленные на территории горных лесничеств, являются экосистемами крупного ранга, со своими им климатическими параметрами, характерными чертами структуры и функционирования, составом экобиоморф нижних ярусов, уровнем продуктивности, а слагающие их типы леса, коренные и производные формации, серии типов леса составляют их содержание, функциональные звенья экосистем, образующие их единство. Выявление их географии, среднемасштабное картографирование облегчается с использованием предлагаемых методов анализа данных дистанционного зондирования. Не все проблемы, связанные с идентификацией ВПК в горах, решены на данном этапе исследования, но актуальность поставленной задачи очевидна.

Современные спутниковые системы дистанционного зондирования в сочетании с ГИС-технологиями открывают возможности для совершенствования методов инвентаризации, мониторинга, изучения географии лесного покрова, меняющейся под воздействием внешних факторов. Это позволяет перейти к внедрению в практику лесопользования качественной природной основы, востребованной на всех уровнях лесного планирования – от планов освоения лесных

участков до лесных планов субъектов Российской Федерации.

Развивая данное направление фундаментальных исследований, можно полагать, что они послужат как большой науке, так и принятию практических решений, позволяющих оптимизировать и обосновать природопользование в горных лесах Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лушня Е.А., Плотников Д.Е., Уварова И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Барталев С.А., Стыценок Ф.В., Егоров В.А., Лушня Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Дробушевская О.В., Пономарев Е.И.* Опыт использования данных TERRA/Modis для сравнения фенологических ритмов светлохвойной подтайги и темнохвойной тайги Приенисейской части Саян // Ботанические исследования в Сибири. Вып. 14. 2006. С. 35–38.
- Жуков А.Б., Поликарпов Н.П.* Основы организации и ведения лесного хозяйства в бассейне оз. Байкал // Лесное хоз-во. 1973. № 1. С. 68–77.
- Исаев А.С.* Задачи изучения лесов с использованием аэрокосмических средств // Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами. Новосибирск: Наука, 1979. С. 3–10.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Актуальные проблемы лесной политики России // Лесное хоз-во. 2001. № 3. С. 9–12. Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами / Отв. ред. Исаев А.С. Новосибирск: Наука, 1979. 216 с.
- Калашиников Е.Н., Первунин В.А., Коротков И.А.* Ландшафтные принципы и технология лесотипологического картографирования с использованием материалов космо- и аэро съемки // Исследование лесов аэрокосмическими методами. Новосибирск: Наука, 1987. С. 34–54.
- Кедровые леса Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 225 с.
- Киреев Д.М., Рубцов Н.И.* Ландшафтный метод лесного дешифрирования аэроснимков. Новосибирск: Наука, 1976. 320 с.
- Коновалова М.Е.* Восстановительно-возрастная динамика смешанных насаждений в низкогорных ландшафтах Восточного Саяна // Лесоведение. 2004. № 3. С. 1–7.
- 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.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
- Пономарев Е.И., Пономарева Т.В.* Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сибирский экологический журн. 2018. № 4. С. 477–486.
- Пономарева Т.В., Пономарев Е.И., Шишикин А.С., Швецов Е.Г.* Мониторинг трансформации старопашотных почв лесостепной зоны при лесовосстановлении // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 154–161.
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России. В 2-х кн. / Под ред. Исаева А.С. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 461 с.
- Региональные проблемы экосистемного лесоводства / Отв. ред. Онучин А.А. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 330 с.
- Руководство по организации и ведению хозяйства в кедровых лесах (кедр сибирский). М.: Госкомлес СССР, 1990. 121 с.
- Типы лесов гор Южной Сибири. / Под ред. Смагина В.Н. Новосибирск: Наука, 1980. 333 с.
- Bartalev S.A., Belward A.S.* Land cover and phenological monitoring in boreal ecosystems using the SPOT – VEGETATION instrument: new observations for climate studies // Proceedings of the Use of Earth Observation data for phenological monitoring. European Commission, JRC, Ispra (VA), Italy 12th–13th December, 2002. P. 41–48.
- Konovalova M.E., Drobusheskaya O.V.* Post-fire dynamics of humid subtaiga in low mountain part of East Sayan // Contemporary Problems of Ecology. September 2013. № 6. Issue 5. P. 469–476.
- Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G.* Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // Canadian J. Forest Research. 2012. № 43. P. 493–506.
- Lu M., Chen B., Liao X., Yue T., Yue H., Ren S., Li X., Nie Z., Xu B.* Forest Types classification Based on Multi-Source Data Fusion // Remote Sensing. 2017. № 9. P. 1153.
- 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.
- Polezhaev A.N.* Vegetation of the Northern Russian Far East in Geographic Information Systems // Russian J. Ecology, 2009. V. 40. № 3. P. 166–171.
- Ponomarev E.I., Kharuk V.I.* Wildfire Occurrence in Forests of the Altai–Sayan Region under Current Climate Changes // Contemporary Problems of Ecology. 2016. V. 9. № 1. P. 29–36.
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Kharuk V.I.* Fires in the Altai–Sayan Region: Landscape and Ecological Confinement // Izvestiya, Atmospheric & Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 7. P. 725–736.
- Vermote, E., Wolfe, R.* MOD09GQ MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006 // NASA EOSDIS LP DAAC, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GQ.006>
- Wan Z., Hook S., Hulley G.* MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006 // NASA EOSDIS LP DAAC, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.006>

The Role of an Altitudinal Zonal Basis and Remote Sensing Data in Sustainable Management of the Mountain Forests

D. I. Nazimova^{1,*}, E. I. Ponomarev^{1,2}, and M. E. Konovalova¹

¹*Sukachev Institute of the Forest SB RAS, Akademgorodok, 50, bld. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

²*Siberian Federal University, Svobodny prospect, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

*E-mail: inpol@mail.ru

Received 31 January 2019

Edited 12 April 2019

Accepted 8 October 2019

This study was performed to prove the necessity for the enhancement of principles of natural basis utilization for the ecosystem-focused forest management in mountainous conditions, using all the collected knowledge, regional data bases and the new remote sensing facilities. The results of using of the spectral features of the vegetation for studying the altitudinal differentiation of forest cover while also employing the thermal sensing, were shown on the example of the Altai-Sayan mountain region. Thus, in the Yenisei part of the Sayans forest-steppe, subtaiga, light coniferous-small-leaved-deciduous forest, mountain dark coniferous, mountain taiga and subalpine classes of altitudinal zones can be defined. For each of those separate systems of forest management should be employed, with taking into account natural features of those forests and their management purpose. A relevant task for the mountain forestry and the multipurpose forest use in general is the enhancement of the ecological and geographical basis and its cartographic realization in middle-scale maps, reflecting not only the formational composition of forest cover, but also the altitudinal ecosystems classes. Modern satellite systems, in coupled with GIS-technologies open new possibilities for the forest cover inventory, monitoring and study methods. It allows us to start implementing a qualitative natural basis into forest management practices, that is currently highly relevant on all levels of forest planning from single forest plot exploitation projects to the forest plans of the Russian Federation subjects.

Keywords: mountain forests, forest cover classification, remote sensing, complexes of forest types by altitudinal zones, thermal channels of Terra/MODIS, seasonal functioning.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (18-05-00781 A).

REFERENCES

- Bartalev S.A., Belward A.S., Land cover and phenological monitoring in boreal ecosystems using the SPOT – VEGETATION instrument: new observations for climate studies, *Proceedings of the Use of Earth Observation data for phenological monitoring*, European Commission, JRC, Ispra (VA), Italy 12th–13th December, 2002, pp. 41–48.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyay E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS (Satellite mapping of the Russian plant cover by spectral radiometer MODIS), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
- Drobusheskaya O.V., Ponomarev E.I., Opyt ispol'zovaniya dannykh TERRA/Modis dlya sravneniya fenologicheskikh ritmov svetlokhvoinoi podtaigi i temnokhvoinoi taigi Prieniseiskoi chasti Sayan (On the experience in TERRA/Modis data application for phenological rhythms comparison between a light-coniferous taiga and dark-coniferous taiga in Yenisey region of Sayans), *Botanicheskie issledovaniya v Sibiri*, 2006, Vol. 14, pp. 35–38.
- Goskomles SSSR*, 1990, No. 74.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Aktual'nye problemy lesnoi politiki Rossii (Relevant problems of Russian forest policy), *Lesnoe khoz-vo*, 2001, No. 3, pp. 9–12.
- Isaev A.S., *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* (Forest ecosystems of Russia: diversity and dynamics), M.: To-varishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, 461 p.
- Isaev A.S., Zadachi izucheniya lesov s ispol'zovaniem aerokosmicheskikh sredstv (Objectives for the forests studying by remote sensing methods) In: *Issledovanie taezhnykh landshaftov distantsionnymi metodami* (Study of forest landscapes with remote techniques), Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 3–10.
- Issledovanie taezhnykh landshaftov distantsionnymi metodami* (Study of forest landscapes with remote techniques), Novosibirsk: Nauka, 1979, 216 p.
- Kalashnikov E.N., Pervunin V.A., Korotkov I.A., Landshaftnye printsipy i tekhnologiya lesotipologicheskogo kartografirovaniya s ispol'zovaniem materialov kosmo- i aeros'emki (Landscape principles and typological forest cartography technology using the satellite and aerial survey data), In: *Issledovanie lesov aerokosmicheskimi metodami*, Novosibirsk: Nauka, 1987, pp. 34–54.
- Kedrovyye lesa Sibiri* (Stone pine forests of Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1985, 257 p.
- Kireev D.M., Rubtsov N.I., *Landshaftnyi metod lesnogo de-shifirovaniya aerosnimkov* (Landscape technique of forest aerial images interpretation), Novosibirsk: Nauka, 1976, 320 p.

- Konovalova M.E., Drobusheskaya O.V., Post-fire dynamics of humid subtaiga in low mountain part of East Sayan, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, No. 6(5), pp. 469–476.
- Konovalova M.E., Vosstanovitel'no-voznrastnaya dinamika smeshannykh nasazhdenii v nizkogornnykh landshaftakh Vostochnogo Sayana (Regeneration and age dynamics of mixed forest in low mountain landscapes of the Eastern Sayan Mountains), *Lesovedenie*, 2004, No. 3, pp. 1–7.
- Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G., Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption, *Canadian J. Forest Research*, 2012, No. 43, pp. 493–506.
- Lu M., Chen B., Liao X., Yue T., Yue H., Ren S., Li X., Nie Z., Xu B., Forest Types classification Based on Multi-Source Data Fusion, *Remote Sensing*, 2017, No. 9, pp. 1153.
- 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, In: *Remote researches and mapping of geosystems structure and dynamics*, Novosibirsk: SB RAS, 2000, pp. 76–81.
- Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Stepanov N.V., Fedotova E.V., Chernevye temnokhvoynye lesa na yuge Krasnoyarskogo kraia i problemy ikh obzornogo kartografirovaniya (Chern dark coniferous forests in Southern Krasnoyarsk Krai and problems of their general mapping), *Lesovedenie*, 2005, No. 1, pp. 12–18.
- Onuchin A.A., *Regional'nye problemy ekosistemnogo lesovodstva*, Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, 2007, 330 p.
- Polezhaev A.N., Vegetation of the Northern Russian Far East in Geographic Information Systems, *Russian Journal of Ecology*, 2009, Vol. 40, No. 3, pp. 166–171.
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and montane forests of South Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1986, 224 p.
- Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Wildfire Occurrence in Forests of the Altai–Sayan Region under Current Climate Changes, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 29–36.
- Ponomarev E.I., Ponomareva T.V., Vliyanie poslepozharnykh temperaturnykh anomalii na sezonnoe protaivanie pochv merzlotnoi zony Srednei Sibiri po distantsionnym dannym (The Effect of Postfire Temperature Anomalies on Seasonal Soil Thawing in the Permafrost Zone of Central Siberia Evaluated Using Remote Data), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2018, No. 4, pp. 477–486.
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Kharuk V.I., Fires in the Altai-Sayan Region: Landscape and Ecological Confinement, *Izvestiya, Atmospheric & Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 725–736.
- Ponomareva T.V., Ponomarev E.I., Shishikin A.S., Shvetsov E.G., Monitoring transformatsii staropakhotnykh pochv lesostepnoi zony pri lesovosstanovlenii (Monitoring of transformation of postagrogenic soils in forest-steppe zone during the process of reforestation), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, No. 2, pp. 154–161.
- Smagin V.N., Il'inskaya S.A., Nazimova D.I., Novosel'tseva I.F., Cherednikova Y.S., *Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* (Forest types in the mountains of the Southern Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1980, 336 p.
- Vermote, E., Wolfe, R., MOD09GQ MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006 available at: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GQ.006>
- Wan Z., Hook S., Hulley G., MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006, available at: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.006>
- Zhukov A.B., Polikarpov N.P., Osnovy organizatsii i vedeniya lesnogo khozyaistva v basseine ozera Baikal (Basis of forestry management in Lake Baikal basin), *Lesnoe khozyaistvo*, 1973, No. 1, pp. 68–77.