

УДК 581.553+528.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА БАССЕЙНА РЕКИ ВЕНГЕРИ НА ОСТРОВЕ САХАЛИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ¹

© 2020 г. К. А. Корзников^{а, *}, Н. Г. Беляева^б, Р. Б. Сандлерский^с

^аБотанический сад-институт ДВО РАН, ул. Маковского, 142, Владивосток, 690024 Россия

^бИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^сИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский проспект, 33, Москва, 119071 Россия

*E-mail: korzkir@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2018 г.

После доработки 16.11.2018 г.

Принята к публикации 06.06.2020 г.

Выполнено моделирование актуального растительного покрова бассейна р. Венгери (восточное побережье центральной части Сахалина) площадью свыше 33 тыс. га. Картографическая модель создана при помощи алгоритма пошагового дискриминантного анализа на основе оригинальных геоботанических данных, цифровой модели рельефа и спектральных характеристик снимков Landsat 5. В растительном покрове выделено 9 физиономических типов растительных сообществ. Из них 3 – нелесные (скальная растительность, горные тундры, луга), 6 – различные типы лесов: пихтово-еловые (*Abies sachalinensis*, *Picea ajanensis*), лиственничники, лиственничные редины (*Larix cajanderi*), стланиковые сообщества (*Pinus pumila*, *Dusheikia fruticosa*), каменноберезовые леса (*Betula ermanii*), мелколиственные и пойменные лиственные леса (*Alnus hirsuta*, *Betula platyphylla*, *Chosenia arbutifolia*, *Populus suaveolens*, *Salix udensis* и др.). Указана принадлежность физиономических типов лесов к синтаксонам эколого-фитоценотической и эколого-флористической классификационных систем. Лесные сообщества развиты на 89.1% территории водосбора. Наибольшую площадь занимают лиственничные леса и редколесья – 33.32% речного бассейна. Ландшафтно-климатические условия района способны поддерживать существование зональных пихтово-еловых лесов, но на их долю приходится только 11.23% территории. Широкое распространение лиственничников обусловлено естественной пирогенной трансформацией темнохвойных лесов. В условиях сильно расчлененного горного рельефа участки растительного покрова затененных склонов северных экспозиций не поддаются корректному автоматическому дешифрированию и моделированию. Восстанавливать растительный покров предлагается по данным визуального дешифрирования снимков высокого разрешения и материалам полевых работ.

Ключевые слова: моделирование растительного покрова, карта растительности, актуальная растительность, вертикальная зональность, пирогенная сукцессия, лиственничные леса, о. Сахалин.

DOI: 10.31857/S002411482005006X

Особенности применения методов дистанционного зондирования для установления пространственной структуры лесного покрова и решения спектра смежных задач изложены в большом числе российских и зарубежных публикаций (Reese et al., 2002; Bartalev et al., 2003; Hansen et al., 2005; Исаев и др., 2009; McRoberts et al., 2010;

Chernen'kova et al., 2013, 2015; Пузаченко и др., 2014; Комарова и др., 2016; Пузаченко, Черненко, 2016; Gomes et al., 2016; Zhu et al., 2016; Belyaeva, Chernen'kova, 2018; и др.). Использование данных дистанционного зондирования расширяет возможности для отображения пространственной неоднородности растительности (Черненко, Морозова, 2017). Наличие в свободном доступе мультиспектральных космических снимков и цифровых моделей рельефа упрощает создание моделей растительного покрова, что особо актуально для инвентаризации растительности и растительных ресурсов труднодоступных малоизученных районов.

¹ Работа выполнена в рамках проекта “Разнообразие экосистем заказника “Восточный”, поддержанного альянсом “Экодело” (изучение биологического разнообразия особо охраняемой природной территории), темы госзадания Ботанического сада-института ДВО РАН (AAAA-A17-117021310193-7) (классификация лесной растительности), темы госзадания Института географии РАН (0148-2019-0007) (картографирование лесного покрова).

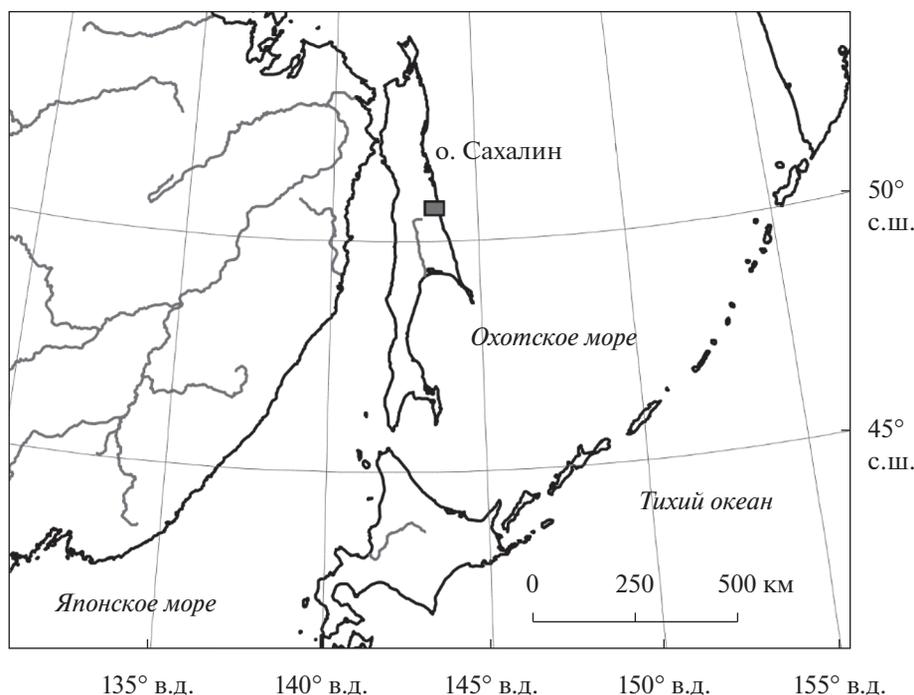


Рис. 1. Расположение территории исследования.

Хотя в мире и европейской части России методы дистанционного зондирования давно дополнили арсенал подходов к изучению растительного покрова, на территории российского Дальнего Востока широкого распространения они до сих пор не нашли. Из проведенных в регионе работ следует упомянуть моделирование растительного покрова с использованием морфометрических параметров рельефа для Ланжинских гор в Северной Охотии (Омелько и др., 2010; Omelko et al., 2012), а также для верхнего течения р. Соколовки, Южный Сихотэ-Алинь (Yakovleva, 2010). В горных регионах рельеф определяют локальные экологические условия, от него зависят микроклимат, почвы, режим локальных нарушений (например, интенсивность схода селей или лавин) и, в конечном счете, растительный покров. Использование морфометрических характеристик рельефа позволяет провести моделирование потенциальной, но не актуальной растительности. Поскольку размещение растительных сообществ определяется не только ландшафтными условиями, но и историей нарушений, распространение производных сообществ невозможно смоделировать, оперируя только геоморфологическими характеристиками местности.

Цель нашей работы заключалась в создании модели актуального растительного покрова, с фокусом на лесную растительность малоизученного района Восточно-Сахалинских гор на о. Сахалин — бассейна р. Венгери. Для достижения цели в ходе полевых исследований мы определили простран-

ственное размещение различных типов растительных сообществ (“обучающая выборка”), а затем связали их со спектральными характеристиками космических снимков и морфометрическими переменными рельефа. Проведенное нами моделирование является первой работой подобного рода для территории Сахалина и позволяет оценить закономерности размещения растительных комплексов в труднодоступной горной части острова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Характеристика района исследования

Бассейн р. Венгери приурочен к центральной части Сахалина, восточному побережью острова (рис. 1). Река берет начало у вершин Набильского хребта Восточно-Сахалинских гор и впадает в Охотское море в 30 км к востоку от места истока. Площадь бассейна составляет свыше 33 тыс. га. Абсолютная высота над уровнем моря меняется от 0 до 1431 м, средняя высота составляет 442 м. Набильскому хребту соответствует структурно-денудационный, крутосклонный сильно расчлененный рельеф (глубина расчленения 700–1150 м). Восточная часть бассейна располагается в пределах Центрального хребта — сильно расчлененного (глубина расчленения 320–720 м над уровнем моря) денудационного низкогорья с крутой и средней крутизны склонами. Водораздельным участкам обоих хребтов местами соответствуют пологие поверхности выравнивания. Почвы горные

лесные, кислые подзолистые, иллювиально-гумусные. В центральной части бассейна, между двумя хребтами, сформировалось денудационное грядовое предгорье с отметками высот 100–260 м, где выражены эрозионно-аккумулятивные формы рельефа – слабонаклонные горные шлейфы. Почвы бурые лесные и кислые подзолистые. Вдоль берега Охотского моря развиты морские абразионно-аккумулятивные слабонаклонные террасы с активными клифами. Долина р. Венгери в верхнем течении узкая, v-образная, аллювиальные террасы отсутствуют. Полуторный характер русла р. Венгери сохраняется до устья. Участки развитой поймы выражены в среднем и нижнем течении.

По данным ближайшей к территории исследования метеостанции Пограничное (30 км к югу, побережье Охотского моря), среднегодовая температура воздуха составляет минус 1.6°C, среднегодовое количество осадков 772.4 мм. Климат муссонный. Вследствие длительного таяния морских льдов начало лета холодное. Охлаждающий эффект также создает холодное Восточно-Сахалинское течение. В конце лета и осенью часты тропические циклоны с обильными осадками и сильными порывами ветра. В горах термический режим более суровый, осадков выпадает больше, чем на побережье (Казakov, Генсиоровский, 2007). В то же время, защищенным от холодного морского воздуха речным долинам соответствует более мягкий по сравнению с побережьем микроклимат. Особенность погодного режима территории заключается в относительно частых грозах, возникающих вследствие столкновения поступающего с запада, прогретого над Тымь-Поронайской равниной, теплого воздуха с холодными воздушными массами Охотского моря.

В зональном отношении территория исследования соответствует северному пределу подзоны южной тайги. Зональные сообщества представлены темнохвойными лесами из *Abies sachalinensis* и *Picea ajanensis*, с преобладанием в древостое последнего вида. Участие растений умеренной флоры выражено слабее, чем в более южных районах острова. В растительном покрове очень редки широколиственные виды, такие как *Fraxinus mandshurica*, *Quercus mongolica*, *Ulmus japonica*. Полностью отсутствуют представители таких семейств как Araliaceae, Hydrangaceae, Rutaceae, нет деревянистых лиан *Actinidia kolomikta* и *Schisandra chinensis*. В вертикальной зональности растительности выражены три пояса: горнотундровый (с доминированием видов из семейства Ericaceae), редколесный (с доминированием *Betula ermanii*) и таежный (*A. sachalinensis* и *P. ajanensis*) (Зоны ..., 1999).

Лесная растительность Сахалина сильно нарушена вследствие экстенсивного лесопользования и масштабных антропогенных пожаров (Харук

и др., 2004). Бассейн р. Венгери был выбран в качестве территории исследования из-за отсутствия населенных пунктов, объектов транспортной инфраструктуры и хозяйственного освоения лесов. Весь бассейн реки входит в состав государственного природного заказника регионального значения “Восточный”. Все это позволяет говорить о минимальном антропогенном преобразовании состава и структуры растительных сообществ.

Сбор и анализ полевых данных

Полевые исследования проведены в 2015 и 2017 г. Полные геоботанические описания выполнены на пробных площадях различного размера, в зависимости от типа сообществ – от 25 до 400 м². Географические координаты мест выполнения описаний фиксировали при помощи GPS-ГЛОНАСС приемника Garmin eTrex 30 с заявленной точностью позиционирования ±7 м. В ходе радиальных маршрутов, помимо полных геоботанических описаний, выполняли также краткие. В общей сложности сделано 60 полных и 20 кратких геоботанических описаний.

Описанные сообщества были отнесены к различным синтаксонам растительности в рамках эколого-фитоценологического (“доминантного”) и эколого-флористического (“метод Браун-Бланке”) подходов. Для создания картографической модели выделено 9 физиономических типов растительности, из которых 6 относятся к лесам, включая заросли стлаников *Pinus pumila* и *Duschekia fruticosa* (Тихомиров, 1946). Названия синтаксонов эколого-фитоценологической классификации приведены по работе В.Ю. Нешатаевой (2009), эколого-флористической классификации – по ряду источников (Vegetation ..., 1988; Krestov, Nakamura, 2002; Krestov et al., 2009). Латинские названия сосудистых растений указаны согласно сводке С.К. Черепанова (1995), мхов – в соответствии с перечнем О.Ю. Писаренко с соавт. (2012), печеночных мхов – согласно перечню В.А. Бакалина (2012).

Моделирование

Создание картографической модели растительного покрова основано на интеграции результатов полевых исследований, данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа. Используются разносезонные безоблачные снимки Landsat 5 TM (24.05.2009 и 28.06.2010) и Landsat 8 OLI TIRS (30.09.2015), а также цифровая модель рельефа (SRTM, абсолютные отметки высот). На основе исходной модели высот в программе ArcGIS 10 были вычислены значения крутизны и экспозиции склонов с пространственным разрешением данных 30 × 30 м. Обучающая выборка составлена из пикселей, соответствующих местам

Таблица 1. Переменные канонических функций, отобранные в ходе пошагового дискриминантного анализа

Отобранная переменная	Толерантность	F _{искл.}	λ	Структурные коэффициенты переменных по трем первым осям		
				Ось 1 (53.2%)	Ось 2 (23.4%)	Ось 3 (18.3%)
Высота над ур. моря, м	0.954	24.313	0.021	0.642	-0.375	-0.647
Ближний инфракрасный (NIR)	0.218	8.925	0.011	0.359	-0.555	0.568
Красный (Red)	0.299	4.421	0.008	0.315	0.214	0.174
Средний инфракрасный (SWIR 2)	0.059	10.961	0.012	0.459	0.171	0.086
Средний инфракрасный (SWIR 1)	0.051	7.592	0.010	0.400	-0.226	0.213

Примечание: F_{искл.} – F-критерий Фишера исключения переменной; λ – Лямбда Уилкса. Анализ выполнен при λ = 0.05; F_{искл.} (40, 294) = 17.127; p < 0.001.

выполнения геоботанических описаний. Процедура классификации проведена методом линейного дискриминантного анализа. Информативный комплекс переменных определялся автоматически, методом пошагового отбора, алгоритмом с последовательным включением переменных (“forward stepwise”), при значениях F-включения, равного 3.84 и F-исключения, равного 2.71. Априорные вероятности отнесения к классу были заданы соответственно размерам выборки обучающего класса. Предсказанные принадлежности пикселей к различным физиономическим типам растительности визуализированы и переведены в векторный формат. На заключительном этапе была проведена генерализация картографической модели до минимальной площади выдела, равной 0.5 га.

В условиях сильно расчлененного рельефа склоны северных экспозиций затенены. Низкая отражающая способность растительных сообществ затененных склонов приводит к некорректным результатам их программного дешифрирования и моделирования. Пиксели затененных склонов северных экспозиций в 100% случаев распознавались как принадлежащие физиономическому классу темнохвойных лесов. В научной литературе проблема подобного рода подробно описана (Giles, 2001; Riano et al., 2003; Richter et al., 2009; Shahtahmassebi et al., 2013). Предложено несколько вариантов ее решения, например, путем внесения поправок в спектральные значения пикселей в зависимости от крутизны и экспозиции склонов. В нашем случае предложенные приемы устранения эффекта глубоких теней оказались недействующими. Поэтому восстановление растительного покрова затененных участков выполнено экспертным путем, с привлечением данных полевых наблюдений и визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения (использованы данные Digital Globe).

Работа с векторными и растровыми данными велась в программных продуктах ENVI 4.7, ERDAS Imagine 2014, а также ArcGIS 10. Дискриминантный анализ проведен в программе IBM SPSS Statistics 20. Описательная статистика и визуализация выполнены в программной среде R.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дешифрирование и моделирование

В результате дискриминантного анализа получено 5 осей, в наилучшей степени разделяющих физиономические типы растительности в пространстве признаков, отражаемых каналами съемки и морфометрическими характеристиками рельефа. В итоговой модели при составлении линейных дискриминантных уравнений с использованием алгоритма последовательного отбора признаков выявлено 5 значимых переменных: яркости каналов снимка Landsat 5 TM от 28 июня 2010 г. (каналы 3, 4, 5 и 7 по нумерации сенсора TM) и фактор высоты над уровнем моря (табл. 1). Включение в модель в качестве предикторов значений яркостей спектральных каналов других снимков (весеннего и осеннего), а также показателей крутизны и экспозиции склонов не улучшают ее прогнозных характеристик. Красный канал видимого спектра (3-й) и ближний инфракрасный канал (4-й) связаны с интенсивностью фотосинтеза. Средние инфракрасные каналы SWIR 1 (5-й) и SWIR 2 (7-й) интерпретируются как связанные с влажностью растительного покрова (Tucker, 1979, 1980). Таким образом, ведущими переменными при разделении выделенных физиономических типов растительности оказались интенсивность фотосинтеза растений и содержание влаги в экосистеме, а также высота над уровнем моря (рис. 2).

Относительное качество классификации обучающей выборки по спектральным и морфомет-

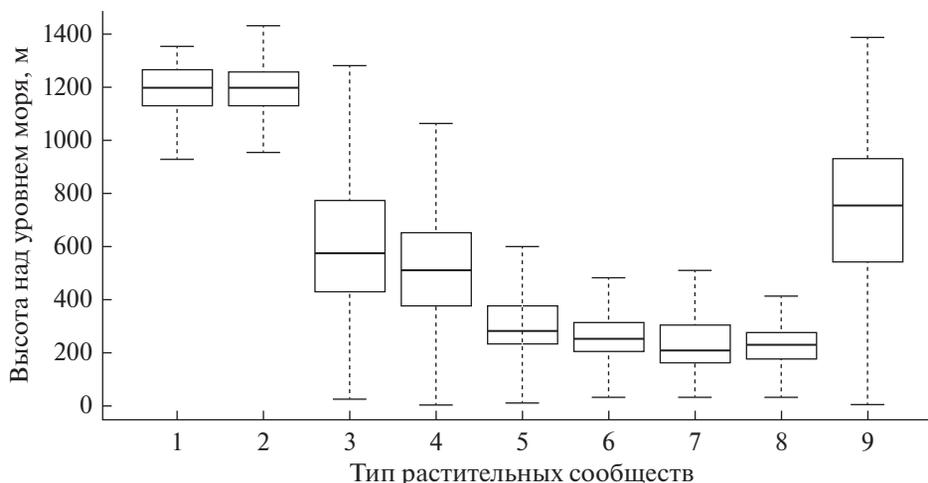


Рис. 2. Распределение сообществ физиономических типов растительности на градиенте высот. Горизонтальные линии соответствуют медианам, прямоугольникам – нижнему (25%) и верхнему (75%) квартилям, “усы” – минимальному и максимальному значениям. Тип растительности: 1 – скальная растительность, 2 – горные тундры, 3 – заросли кедрового и ольхового стлаников, 4 – каменноберезовые леса и криволесья, 5 – пихтово-еловые леса, 6 – мелколиственные и пойменные лиственные леса, 7 – лиственничные леса; 8 – лиственничные редколесья, 9 – луга.

рическим данным составляет 90% (табл. 2). Для 6 из 9 физиономических типов растительности обучающая выборка классифицирована с максимальной точностью (100%). Пиксели, соответствующие стланиковым сообществам, частично были отнесены к горным тундрам и лиственничным редколесьям. С наименьшей точностью были классифицированы мелколиственные и пойменные леса – треть пикселей, принадлежащая этим сообществам, оказалась отнесена к темнохвойным лесам. Это связано с пространственной сопряженностью сообществ обоих типов в пределах шлейфов склонов Набильского хребта и частичным вкраплением массивов вторичных мел-

колиственных древостоев в контуры темнохвойных лесов. По той же причине небольшая часть пикселей лугов распознана как каменноберезовые леса – сообщества соседствуют и постепенно переходят друг в друга по ложинам и тальвегам горных ручьев.

Модель растительного покрова

Согласно созданной картографической модели (рис. 3), площадь лесопокрываемой территории в бассейне р. Венгери составляет 89.1% (табл. 3). Реальная площадь поверхности, с учетом кривизны рельефа, больше ее проекции на плоскость

Таблица 2. Качество классификации обучающей выборки

Физиономический тип	№	Предсказанная принадлежность, %								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Растительность скал и осыпей	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Горные тундры	2	0	100	0	0	0	0	0	0	0
Стланиковые сообщества	3	0	20	70	0	0	0	0	10	0
Каменноберезовые леса	4	0	0	0	100	0	0	0	0	0
Пихтово-еловые леса	5	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Мелколиственные и пойменные лиственные леса	6	0	0	0	0	33.3	66.7	0	0	0
Лиственничные леса	7	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Лиственничные редколесья	8	0	0	0	0	0	0	0	100	0
Луга	9	0	0	0	18.2	0	0	0	0	81.8

Примечание: числами обозначены номера (№) обсуждаемых физиономических типов растительности.

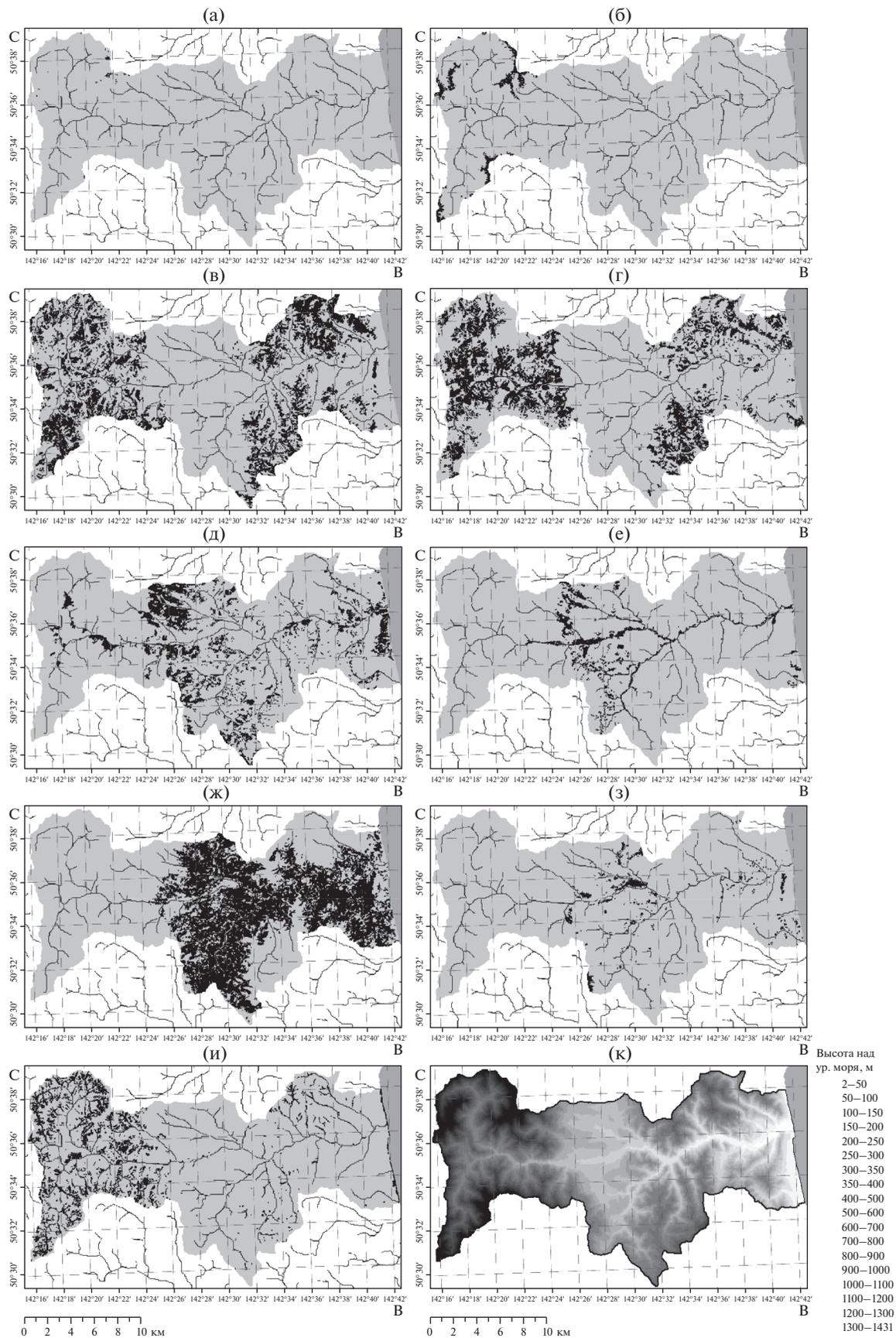


Рис. 3. Размещение физиономических типов растительности в бассейне р. Венгери по результатам моделирования: а – скальная растительность, б – горные тундры, в – стланики, г – каменноберезовые леса и криволеся, д – пихтово-еловые леса, е – мелколиственные и пойменные лиственные леса, ж – лиственничные леса, з – лиственничные редины, и – луга, к – высота над ур. моря.

почти на 7150 га. Соответственно, растительные сообщества, преимущественно приуроченные к горным склонам, занимают несколько большую площадь.

Нелесная растительность

В составе нелесной растительности выделено 3 физиономических типа: сообщества скал и осыпей, горных тундр, лугов. Сообщества скальной и осыпной растительности (тип 1) приурочены к выходам коренных пород и денудационным останцам, осыпям, курумам. Сомкнутый покров из сосудистых растений в таких местообитаниях обычно отсутствует. Горные тундры (тип 2) представлены растительными сообществами эрикоидных кустарничков и других арктоальпийских растений (*Dryas ajanensis*, *Empetrum sibiricum*, *Ledum decumbens*, *Loiseleuria procumbens*, *Phyllodoce caerulea*, *Salix berberifolia*, *S. reticulata*, *Sieversia pentapetala* и др.). Физиономический тип лугов (тип 9) объединяет травяные сообщества нивальных ложбин, горных склонов и морских террас. Заросли высокотравья (*Aconogonon weyrichii*, *Filipendula camtschatica*, *Senecio cannabifolius*) формируются по местам схода селевых потоков и лавин, в долинах ручьев и горных потоков.

Лесная растительность

Лесная растительность исследованного района образована сообществами как минимум 14 формаций эколого-фитоценотической или 7 союзов эколого-флористической классификации (табл. 4).

Стланиковые сообщества (тип 3) представлены как чистыми, так и смешанными зарослями *Pinus pumila* и *Duschekia fruticosa*. Они занимают верхние части горных склонов и привершинные участки, водоразделы, седловины. Сообщества *P. pumila* также развиваются на вершинах и склонах невысоких сопок, если те были пройдены пожарами. В благоприятных условиях высота стлаников может достигать 4–5 м, а в наиболее суровых, например, на подветренных крутых каменистых склонах, она не превышает 0.3–0.4 м. Пространственная структура стланиковых сообществ простая, а флористической состав небогатый. Из кустарников наиболее часто встречается *Sorbus sambucifolia*. Под плотно сомкнутыми кронами можно обнаружить *Chamaepericlymenum canadense*, *Ledum decumbens*, *Maianthemum dilatatum*, *Rubus pedatus*, *Vaccinium vitis-idaea*. Моховой покров развит слабо, представлен широко распространенными видами, такими как *Pleurozium schreberi*, *Ptilium crista-castrensis*, *Dicranun* spp. На старых ветвях произрастает *Ptilidium pulcherrimum*.

Таблица 3. Площади сообществ различных физиономических типов растительности

№	Физиономический тип	S_1 , га	S_2 , га	Доля, %	$S_{ave} \pm SD$, га	S_{min} , га	S_{max} , га
1	Растительность скал и осыпей	46.38	40.56	0.12	1.45 ± 0.97	0.54	4.32
2	Горные тундры	705.20	612.98	1.85	4.64 ± 12.51	0.53	80.64
3	Стланиковые сообщества	7675.36	6824.54	20.64	3.2 ± 10.090	0.50	206.64
4	Каменноберезовые леса	7562.85	6558.77	19.84	3.37 ± 8.60	0.54	238.23
5	Пихтово-еловые леса	4309.54	3714.95	11.23	2.49 ± 7.27	0.54	193.14
6	Мелколиственные и пойменные лиственные леса	1368.34	1345.06	4.07	1.95 ± 3.53	0.54	48.78
7	Лиственничные леса	10889.28	10363.55	31.34	5.52 ± 39.08	0.52	1219.38
8	Лиственничные редколесья	672.94	653.09	1.98	2.11 ± 5.70	0.54	85.14
9	Луга	6988.37	2952.55	8.93	2.66 ± 5.80	0.52	87.57

Примечание: S_1 – площадь с учетом кривизны рельефа; S_2 – площадь в проекции; S_{ave} – средняя площадь выдела картографической модели; SD – среднее квадратическое отклонение; S_{min} – минимальная площадь выдела; S_{max} – максимальная площадь выдела.

Таблица 4. Принадлежность лесных сообществ к синтаксонам растительности

Растительное сообщество	Формация согласно эколого-фитоценотической классификации	Синтаксоны согласно эколого-флористической классификации		
		Класс	Порядок	Союз
Сообщества кедрового стланика (3)	<i>Pinetosum pumilae</i>	<i>Vaccinio-Piceetea</i>	<i>Vaccinio-Pinetalia</i>	<i>Vaccinio-Pinion pumilae</i>
Сообщества ольхового стланика (3)	<i>Alnetosum fruticosae</i>	<i>Betulo-Ranunculetea</i>	<i>Streptopo-Alnetalia</i>	<i>Smilacino-Betulion ermanii</i>
Каменноберезовые леса и криволеся горных склонов (4)	<i>Betuleta ermanii</i>	<i>Betulo-Ranunculetea</i>	<i>Streptopo-Alnetalia</i>	<i>Athyrio-Weigelion middendorffianae</i>
Каменноберезовые леса на месте коренных темнохвойных (4)	<i>Betuleta ermanii</i>	неизвестно	неизвестно	неизвестно
Пихтово-еловые леса (5)	<i>Piceetosum ajanensis</i>	<i>Vaccinio-Piceetea</i>	<i>Abieti-Piceetalia</i>	<i>Picenion jesoensis</i> <i>Pino-Piceion jezoensis</i>
Белоберезовые леса и редколесья на месте коренных темнохвойных (6)	<i>Betuleta platyphyllae</i>	неизвестно	неизвестно	неизвестно
Осиновые леса и редколесья на месте коренных темнохвойных (6)	<i>Populeta tremulae</i>	неизвестно	неизвестно	неизвестно
Пойменные леса (6)	<i>Saliceta udensis</i>	<i>Salicetea sachalinensis</i>	неизвестно	<i>Filipendulo-Salicion udensis</i>
Чозениевые леса (6)	<i>Chosenieta arbutifoliae</i>			
Топольевые леса (6)	<i>Populetosum suaveolentis</i>			
Ольховые леса (6)	<i>Alneta hirsutae</i>			
Черемуховые леса и заросли (6)	<i>Padeta avi</i>			
Лиственничные леса (7)	<i>Lariceta cajanderi</i>	<i>Vaccinio-Piceetea</i>	<i>Ledo-Laricetalia</i>	<i>Ledo-Laricion cajanderi</i>
Лиственничные редколесья (8)	<i>Sublariceta cajanderi</i>			

Примечание: цифры после названий сообществ указывают на их принадлежность к физиономическим типам растительности (табл. 2, 3; рис. 2).

Сообщества каменноберезовых лесов (*Betula ermanii*, тип 4) занимают средние и верхние части горных склонов, формируют парковые разреженные древостои или криволеся. В долинах и нижних частях склонов представлены вторичными древостоями на месте коренных темнохвойных лесов. Высота древесного яруса зависит от конкретных экологических условий, в долинах может достигать 20 м и более, а в верхних частях горных склонов не превышает 4–5 м. В зависимости от условий местообитаний формируются кустарниковые, крупнотравные и разнотравные типы этих сообществ (Кабанов, 1940). К числу постоянных

спутников *B. ermanii* относятся кустарники *Sorbus sambucifolia* и *Weigela middendorffiana*. Нередко кустарниковый ярус образуют стланики *Pinus pumila* и *Duschekia fruticosa*. Для крупнотравных вариантов характерно присутствие *Aconogonon weyrichii*, *Cirsium kamtschaticum*, *Filipendula camtschatica*, *Senecio cannabifolius*. К наиболее увлажненным вариантам горных каменноберезовых лесов приурочены охраняемые реликтовые виды травянистых растений *Diphylleia grayi* и *Macropodium pterosperrum*. Каменноберезовые криволеся и заросли стлаников могут произрастать на одних и тех же высотах и соседствовать друг с другом, но

при этом занимают различные элементы рельефа. Сообщества *B. ermanii* тяготеют к ложинам и бортам долин горных ручьев, где складываются условия накопления снега и защиты от иссушения, повреждения зимними ветрами.

Темнохвойные пихтово-еловые леса (*Abies sachalinensis*, *Picea ajanensis*, тип 5) являются зональными климаксовыми сообществами, но занимают лишь немногим более 11% территории бассейна р. Венгери. Основные массивы приурочены к предгорьям Набильского хребта в центральной части бассейна р. Венгери. Сообщества распространены в нижних частях склонов, на делювиальных шлейфах и коренных террасах речных долинах. В древостоях, помимо двух содоминантов *A. sachalinensis* и *P. ajanensis*, присутствуют *Betula ermanii* и *Larix cajanderi*. В зависимости от состава подчиненных ярусов выявлены следующие типы пихтово-еловых лесов, ранее подробно описанные Н.Е. Кабановым (1940): моховые (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Rhytidiadelphus triquetrus*, *Dicranum* spp.), папоротниковые (*Gymnocarpium dryopteris*, *Leptorumohra amurensis*, *Phegopteris connectilis*), кустарниковые (*Sorbus sambucifolia*, *Vaccinium ovalifolium*,) и мелкотравные (*Chamaepericlymenum canadense*, *Maianthemum bifolium*, *M. dilatatum*, *Oxalis acetosella*). На гниющей древесине развиваются *Bazzania trilobata*, *Macrodiplphyllum plicatum*. В рамках эколого-флористической классификации разнообразие сообществ темнохвойных лесов укладывается в объем ассоциаций *Weigelo middendorffiana*–*Piceetum jezoensis* Krestov et Nakamura 2002 и *Vaccinio vitis-idaeae*–*Piceetum jezoensis* Krestov et Nakamura 2002.

Мелколиственные и пойменные лиственные (согласно А.Г. Крылову (1984)) леса (тип 6) – наиболее разнообразная по составу доминантов древесного яруса группа. Пойменные леса представлены комплексом сообществ с доминированием деревьев из семейства *Salicaceae* (*Chosenia arbutifolia*, *Populus suaveolens*, *Salix cardiophylla*, *S. udensis*). На участках речных долин с застойным увлажнением и вдоль тальвегов ручьев формируются сообщества с доминированием *Alnus hirsuta*, иногда редкостойные, переходящие во влажные заросли крупнотравья. Древостои с доминированием *Betula platyphylla* и *Populus tremula* существуют на месте коренных темнохвойных лесов в пределах межгорной депрессии между Набильским и Центральным хребтами, а также на ограниченных участках в долине р. Венгери.

Сообщества лиственных лесов (*Larix cajanderi*, тип 7) занимают наибольшие площади в бассейне р. Венгери. Широкое развитие лиственных лесов на месте коренных темнохвойных объясняется естественными пожарами различной давности. Почти все лиственные леса исследованного района принадлежат к различным ста-

диям пирогенных сукцессий, поэтому состав и структура сообществ зависят от времени, прошедшего с момента пожара. Для наиболее молодых лесов отмечена простая вертикальная структура и небогатый видовой состав растений подчиненных ярусов (*Pinus pumila*, *Ledum hypoleucum*, *Vaccinium vitis-idaeae*, *Polytrichum* spp.). На местах давних пожаров древостой с 2–3 ярусами, второй ярус образован *Picea ajanensis*, реже *Abies sachalinensis*. *Pinus pumila* из состава таких лесов почти полностью выпадает, лишь иногда встречаются отдельные сильно угнетенные особи. В кустарниковом ярусе доминирует *Vaccinium ovalifolium*, в травяном – виды таежного мелкотравья и папоротники. Бывает выражен почти сплошной покров из зеленых мхов (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Dicranum* spp.). Непирогенные лиственничники, формирование и существование которых определяется эдафическими условиями, приурочены к местообитаниям с недостаточным дренажем. На отдельных участках по долине ручьев могут формироваться высокоствольные древостои с доминированием в травяном ярусе *Osmundastrum asiaticum*.

Лиственничные редины (тип 8) – это низкополнотные лишайниковые или кедровостланниковые пирогенные сообщества. Они почти никогда не занимают более или менее крутых склонов, соответствуют выположенным поверхностям, плоским вершинам невысоких сопков, и, по-видимому, формируются в условиях очень хорошего дренажа. Помимо *Larix cajanderi* в древесном ярусе могут встречаться отдельные деревья *Betula platyphylla* и *Salix caprea*. В кустарниковом ярусе присутствуют *Pinus pumila* и *Sorbus sambucifolia*, реже – *Juniperus sibirica*. В лишайниковых лиственничниках кустарниковый ярус обычно не сомкнут, а в кедровостланниковых *Pinus pumila* на отдельных площадях образует труднопроходимые заросли. В этих сообществах растения нижних ярусов имеют незначительное проективное покрытие. Как правило, в их составе присутствуют: *Angelica maximowiczii*, *Antennaria dioica*, *Diphysastrum complanatum*, *Spiraea betulifolia*, *Vaccinium vitis-idaea*. Мхи встречаются в виде компактных куртин, обычно это *Polytrichum* spp., иногда *Pleurozium schreberi*. На отдельных площадях сплошной покров образуют виды рода *Cladonia*.

Пирогенная трансформация лесной растительности

В пределах бассейна р. Венгери территория, занятая производными лесами с доминированием *Larix cajanderi*, почти 3 раза превышает площадь зональных темнохвойных лесов из *Abies sachalinensis* и *Picea ajanensis*. Общеизвестна точка зрения, согласно которой широкое распространение лиственничников на местообитаниях ели –

это результат многовекового влияния огня на растительный покров. Как указывает Ю.И. Манько (1987), на Дальнем Востоке России лиственничные леса послепожарного происхождения носят как длительно-устойчивый характер, так и объединены с темнохвойными лесами различными стадиями восстановительных смен. Лиственничные леса обладают высокой горимостью, особенно сообщества сухих лишайниковых вариантов. Неоднократные пожары или беглые палы обычно уничтожают “связующие звенья” лиственничников с климаксовыми темнохвойными сообществами. Широкое развитие лиственничников в районе исследования, таким образом, по всей видимости, связано с частым возникновением естественных лесных пожаров, причиной которых являются обычные для района бассейна р. Венгери сухие грозы.

Особенности моделирования

Реально существующий лесной покров в пределах любого более или менее обширного участка земной поверхности не представляет собой однородного контура. Воздействие естественных факторов нарушений, таких как пожары, ветровалы, очаги развития насекомых-фитофагов, сели, наводнения и многие другие, приводит к формированию комплексной пространственной структуры растительного покрова. Поэтому для создания моделей актуального растительного покрова необходимо использовать не только внешние по отношению к растительным сообществам данные (такие как морфометрические показатели рельефа), но и данные, которые бы соответствовали признакам различных растительных комплексов, находящие отражение в яркостях спектральных каналов или их комбинаций.

Связанное с глубоким расчленением рельефа затенение поверхности горных склонов вносит существенные искажения в результаты автоматического дешифрирования и космических снимков и основанного на нем моделирования. Как показывает опыт нашей работы, в случае моделирования растительного покрова на относительно небольших по площади территориях, проблема наличия сильно затененных участков может быть решена путем экспертной оценки и визуального дешифрирования снимков высокого разрешения. Поэтому именно склонам северной экспозиции необходимо уделять особое внимание в ходе проведения этапа сбора полевых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование цифровой модели рельефа и спектральных характеристик растительных сообществ позволило провести моделирование актуального растительного покрова бассейна р. Вен-

гери. Горный рельеф территории определяет существование высотных поясов растительного покрова. Наиболее возвышенные и крутосклонные формы рельефа заняты стланиковыми сообществами (*Dushekia fruticosa*, *Pinus pumila*) и древостоями из каменной березы (*Betula ermanii*). Нижний высотный пояс занят зональными темнохвойными лесами из *Abies sachalinensis* и *Picea ajanensis*, но на их долю приходится только около 11% территории речного бассейна. Более 33% территории речного бассейна занимают леса и редколесья из *Larix cajanderi*, в основном послепожарного происхождения. Поскольку пространственная структура растительного покрова зависит не только от ландшафтно-климатических факторов, но также и от истории нарушений (в т.ч. от лесных пожаров), то создание моделей актуального растительного покрова не может быть выполнено только на основании внешних по отношению к растительному покрову признаков. Безошибочное автоматическое дешифрирование и моделирование растительного покрова в регионах с горным рельефом невозможно из-за сильного затенения и отсутствия отражения от находящихся в глубокой тени склонов. Восстановление актуальной растительности для таких площадей возможно провести экспертным путем, с использованием снимков высокого разрешения и привлечением данных полевых исследований, на что необходимо обращать внимание при планировании экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакалин В.А. Конспект печеночников // Бриофлора Сахалина. Владивосток: Морской гос. университет, 2012. С. 44–112.
- Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных стран. Пояснительный текст и легенда карты / Отв. ред. Огуреева Г.Н. М.: ЭКОР, 1999. 64 с.
- Исаев А.С., Князева С.В., Пузаченко М.Ю., Черненко-ва Т.В. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 55–66.
- Кабанов Н.Е. Лесная растительность Советского Сахалина. Владивосток: Горнотаежная станция АН СССР, 1940. 210 с.
- Казиков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Влияние вертикального градиента осадков на характеристики гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 4. С. 342–347.
- Комарова А.Ф., Куксина Н.В., Зудкин А.Г. Картографирование темнохвойных лесов Северо-Западного Кавказа методом нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 157–166.
- Крылов А.Г. Жизненные формы лесных фитоценозов. Л.: Наука, 1984. 184 с.

- Манько Ю.И. Ель аянская. Л.: Наука, 1987. 280 с.
- Нешатаева В.Ю. Растительность полуострова Камчатка. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 537 с.
- Омелько А.М., Якубов В.В., Бакалин В.А., Великанов А.В., Черданцева В.Я., Скирина И.Ф., Яковлева А.Н., Крестов П.В. Растительный покров Ланжинских гор (Охотия) // Комаровские чтения. 2010. Т. 57. С. 103–163.
- Писаренко О.Ю., Игнатов М.С., Черданцева В.Я., Игнатьева Е.А. Конспект мхов // Бриофлора Сахалина. Владивосток: Морской гос. ун-т, 2012. С. 123–268.
- Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191.
- Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю. Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29.
- Тихомиров Б.А. К происхождению ассоциаций кедрового стланика (*Pinus pumila* Rgl.) // Материалы по истории флоры и растительности СССР. Вып. 2. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 491–537.
- Харук В.И., Щербинина И.С., Якубайлик О.Э., Касишке Э. Анализ пространственного распределения гарей на острове Сахалин // Лесоведение. 2004. № 5. С. 66–80.
- Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- Черненко Т.В., Морозова О.В. Классификация и картографирование ценотического разнообразия лесов // Лесоведение. 2017. № 4. С. 243–255.
- Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // International J. Remote Sensing. 2003. V. 24. № 9. P. 1977–1982.
- Belyaeva N.G., Chernen'kova T.V. Relationship between habitat properties and composition of communities in conifer-broadleaf Forest // Russian J. Ecology. 2018 V. 49. № 2. P. 111–118.
- Chernen'kova T.V., Basova E.V., Puzachenko M.Y., Koroleva N.E. Assessment of forest spatial differentiation in Murmansk Province using field surveys and remote sensing data // Contemporary Problems of Ecology. 2013. V. 6. № 7. P. 746–754.
- Chernen'kova T.V., Puzachenko M.Yu., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G. // An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales // Botanica Pacifica. 2015. V. 4. № 1. P. 37–46.
- Giles P. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2001. V. 67. № 7. P. 833–839.
- Gomes C., White J.C., Wulder M.A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 116. P. 55–72.
- Hansen M.C., Townshend J.R.G., DeFries R.S., Carroll M. Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales // International J. Remote Sensing. 2005. V. 26. № 19. P. 4359–4380.
- Krestov P.V., Nakamura Yu. Phytosociological study of the *Picea jezoensis* forests of the Far East // Folia Geobotanica. 2002. V. 37. № 4. P. 441–473.
- Krestov P.V., Ermakov N.B., Osipov S.V., Nakamura Yu. Classification and phytogeography of larch forests of Northeast Asia // Folia Geobotanica. 2009. V. 44. № 4. P. 323–363.
- McRoberts R.E., Cohen W.B., Naesset E., Stehman S.V., Tomppo E.O. Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products // Scandinavian J. Forest Research. 2010. V. 25. № 4. P. 340–367.
- Omelko A.M., Krestov P.V., Yakovleva A.N. A topography-based model of the vegetation cover of the Lanchinskije mountains // Botanica Pacifica. 2012. V. 1. № 1. P. 109–119.
- Reese H., Nilsson M., Sandström P., Olsson H. Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data // Computers & Electronics in Agriculture. 2002. V. 37. № 1–3. P. 37–56.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aduado I. Assessment of different topographic corrections on Landsat-TM data for mapping vegetation types // IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing. 2003. V. 41. № 5. P. 1056–1061.
- Richter R., Kellenberger T., Kaufmann H. Comparison of topographic correction methods // Remote Sensing. 2009. V. 7. № 1. P. 184–196.
- Shahatmasebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Zhangqian Sh. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing // Chinese Geographical Science. 2013. V. 23. № 4. P. 403–420.
- Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. № 2. P. 127–150.
- Tucker C.J. Remote sensing of leaf water content in the near-infrared // Remote Sensing of Environments. 1980. V. 10. № 1. P. 23–32.
- Vegetation of Japan. Vol. 9 Hokkaido Ed. A. Miyawaki. Tokyo, Shibundo, 1988. 563 p.
- Zhu Z., Fu Y., Woodcock C.E., Olofsson P., Vogelmann J.E., Holden C., Wang M., Dai S., Yu Y. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000–2014) // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 243–257.
- Yakovleva A.N. A model of vegetation pattern at the Verkhneussuriysky Biogeocenotic Station // Russian J. Ecology. 2010. V. 41. № 4. P. 307–315.

Modeling the Forest Cover of the Vengeri River Basin on the Sakhalin Island Using the Remote Sensing Data

K. A. Korznikov^{1,*}, N. G. Belyaeva², and R. B. Sandlerskiy³

¹Botanical Garden-Institute, Far-East branch of the RAS, Makovskogo st., 142, Vladivostok, 690024 Russia

²Institute of Geography of the RAS, Staromonetnyy ln., 29, Moscow, 119017 Russia

³Severtsov institute of ecology and evolution of the RAS, Leninsky ave., 33, Moscow, 119071 Russia

*E-mail: korzkir@mail.ru

A modelling of an actual vegetative cover of the Vengeri river basin (eastern coast of the central Sakhalin), with an area of more than 33 thousand ha. Cartographic model has been created by utilizing the algorithm of step-by-step discriminant analysis based on the original geobotanical data, digital relief model and spectral analysis of Landsat 5 images. In vegetative cover 9 physiognomical types of vegetative communities were defined, 3 of them being non-forest (rock vegetation, mountainous tundra, alpine meadows), while 6 were different kinds of forests: fir-spruce forests (*Abies sachalinensis*, *Picea ajanensis*), larch forests and thin forests (*Larix cajanderi*), elfin wood formations (*Pinus pumila*, *Dushekia fruticosa*), Erman's birch forests (*Betula ermanii*), parvifoliolate and flood-land deciduous forests (*Alnus hirsuta*, *Betula platyphylla*, *Chosenia arbutifolia*, *Populus suaveolens*, *Salix udensis* и др.). A correlation was determined between the physiognomical types of the forest and the syntaxons of ecophytocoenotic and ecofloristic classification systems. Forest communities have developed on 89.1% of the river basin, the largest area being covered by the larch forests and thin forests (33.32%). Landscape and climatic conditions of the region allow the existence of fir-spruce forests, typical for the zone, but they cover only 11.23% of the whole territory. A wide spread of larch forests results from the natural pyrogenic transformation of the dark coniferous forests. Under the conditions of mountain landscape breaking up the vegetative cover, the forested regions situated on the shadowed northern slopes proved to be impossible to decipher and model automatically. The paper suggests the reconstruction to be performed using the visual deciphering of the high-resolution images and the field studies data.

Keywords: vegetative cover modeling, vegetation map, actual vegetation, altitudinal zoning, pyrogenic succession, larch forests of the Sakhalin island.

Acknowledgement: The study was carried out within the framework of the “Ecosystems diversity of the “Vostochnyi” reserve”, backed by the “Ekodelo” alliance (studying the biodiversity of the special protected natural area), within the framework of the State Contract of the Botanical Garden-Institute, Far-East branch of the RAS (AAAA-A17-117021310193-7) (forest vegetation classification), within the framework of the State Contract of the Institute of Geography of the RAS (0148-2019-0007) (mapping of the forest cover).

REFERENCES

- Bakalin V.A., *Konspekt pechenochnikov* (Conspectus of hepatic flora), In: Brioflora Sakhalina (Bryophytes of Sakhalin), Vladivostok: Morskoy gos. un-t, 2012, pp. 44–112.
- Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S., A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *International J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No 9, pp. 1977–1982.
- Belyaeva N.G., Chernen'kova T.V. Relationship between Habitat Properties and Composition of Communities in Conifer-Broadleaf Forest, *Russian J. Ecology*, 2018, Vol. 49, No. 2, pp. 111–118.
- Cherepanov S.K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* (Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR), St. Petersburg, Mir i sem'ya, 1995, 992 p.
- Chernen'kova T.V., Basova E.V., Puzachenko M.Y., Koroleva N.E., Assessment of forest spatial differentiation in Murmansk Province using field surveys and remote sensing data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No 7, pp. 746–754.
- Chernen'kova T.V., Morozova O.V., Klassifikatsiya i kartografirovaniye tsenoticheskogo raznoobraziya lesov (Classification and mapping of coenotic diversity of forests), *Lesovedenie*, 2017, No 4, pp. 243–255.
- Chernen'kova T.V., Puzachenko M.Yu., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G. An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales, *Botanica Pacifica*, 2015, Vol. 4, No 1, pp. 37–46.
- Giles P., Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, Vol. 67, N 7, pp. 833–839.
- Gomes C., White J.C., Wulder M.A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 116, pp. 55–72.
- Hansen M.C., Townshend J.R.G., DeFries R.S., Carroll M., Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales, *International J. Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, No 19, pp. 4359–4380.
- Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.J., Chernen'kova T.V., Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov (Use of satellite data for monitoring biodiversity of forest), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, No 2, pp. 55–66.
- Kabanov N.E., *Lesnaya rastitel'nost' sovetskogo Sakhalina* (Forest vegetation of Soviet Sakhalin), Vladivostok: Gornotaezhnaya stantsiya AN SSSR, 1940, 210 p.

- Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V., Vliyanie vertikal'nogo gradienta osadkov na kharakteristiki gidrologicheskikh, lavinnykh i selevykh protsessov v nizkogor'ye (Influence of altitude gradient on hydrogeology characteristics of low mountains avalanches and mudflow processes), *Geokologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2007, No 4, pp. 342–347.
- Kharuk V.I., Shcherbinina I.S., Yakubaylik O.E., Kasishke E., Analiz prostranstvennogo raspredeleniya garey na ostrove Sakhalin (Analysis of spatial distribution of slashes on Sakhalin Island), *Lesovedenie*, 2004, No 5, pp. 66–80.
- Komarova A.F., Kuksina N.V., Zudkin A.G., Kartografirovaniye temnokhvoynnykh lesov Severo-Zapadnogo Kavkaza metodom neyronnykh setey (Mapping of the North-West Caucasus dark-coniferous forests with neural network approach), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No 5, pp. 157–166.
- Krestov P.V., Ermakov N.B., Osipov S.V., Nakamura Yu., Classification and phytogeography of larch forests of Northeast Asia, *Folia Geobotanica*, 2009, Vol. 44, No 4, pp. 323–363.
- Krestov P.V., Nakamura Yu., Phytosociological study of the *Picea jezoensis* forests of the Far East, *Folia Geobotanica*, 2002, Vol. 37, Np 4, pp. 441–473.
- Krylov A.G. *Zhiznennyye formy lesnykh fitotsenozov* (Life forms of forest phytocoenosis). Leningrad: Nauka, 1984. 184 p.
- Man'ko Yu.I., *El' ayanskaya* (Ajan spruce), Leningrad: Nauka, 1987, 280 p.
- McRoberts R.E., Cohen W.B., Naesset E., Stehman S.V., Tomppo E.O., Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products, *Scandinavian J. Forest Research*, 2010, Vol. 25, No 4, pp. 340–367.
- Neshataeva V.Yu., *Rastitel'nost' poluostrova Kamchatka* (Vegetation of The Kamchatka Peninsula), M.:, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2009, 537 p.
- Omelko A.M., Krestov P.V., Yakovleva A.N., A topography-based model of the vegetation cover of the Lanchinsk Mountains, *Botanica Pacifica*, 2012, Vol. 1, No 1, pp. 109–119.
- Omel'ko A.M., Yakubov V.V., Bakalin V.A., Velikanov A.V., Cherdantseva V.Ya., Skirina I.F., Yakovlevka A.N., Krestov P.V., Rastitel'nyy pokrov Lanchinskikh gor (Okhotiya) (Vegetation cover of the Lanchinsk mountains (Ochotia)) // *Komarov's lectures*, 2010, Vol. 57, pp. 103–163.
- Pisarenko O.Yu., Ignatov M.S., Cherdantseva V.Ya., Ignatova E.A., *Konspekt mkhov* (Conspectus of moss flora), In: *Brioflora Sakhalina* (Bryophytes of Sakhalin), Vladivostok: Morskoy gos. un-t, 2012, pp. 123–268.
- Puzachenko M.Yu., Chernen'kova T.V., Opredelenie faktorov prostranstvennogo var'irovaniya rastitel'nogo pokrova s ispol'zovaniem DDZ, TsMR i polevykh dannykh na primere tsentral'noy chasti Murmanskoy oblasti (Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No 5, pp. 167–191.
- Puzachenko Yu.G., Sandlerskiy R.B., Krenke A.N., Puzachenko M.Yu., Mul'tispektral'naya distantsionnaya informatiya v issledovanii lesov (Multispectral remote information in forest research), *Lesovedenie*, 2014, No 5, pp. 13–29.
- Reese H., Nilsson M., Sandström P., Olsson H., Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, Vol. 37, No 1–3, pp. 37–56.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aduado I., Assessment of different topographic corrections on Landsat-TM data for mapping vegetation types, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No 5, pp. 1056–1061.
- Richter R., Kellenberger T., Kaufmann H., Comparison of topographic correction methods, *Remote Sensing*, 2009, Vol. 7, No 1, pp. 184–196.
- Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Zhangquan Sh., Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing, *Chinese Geographical Science*, 2013, Vol. 23, N 4, pp. 403–420.
- Tikhomirov B.A., *K proiskhozhdeniyu assotsiatsiy kedrovogo stlanika (Pinus pumila Rgl.)* (On the origin of dwarf pine associations (*Pinus pumila* Rgl.)), In: *Materialy po istorii flory i rastitel'nosti SSSR* (Materials of flora and vegetation history in USSR), Vol. 2. Moscow, Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1946, pp. 491–537.
- Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, No 2, P.127–150.
- Tucker C.J., Remote sensing of leaf water content in the near-infrared, *Remote Sensing of Environment*, 1980, Vol. 10, No 1, pp. 23–32.
- Vegetation of Japan. Vol. 9 Hokkaido, ed. A. Miyawaki, Tokyo, Shibundo, 1988, 563 p.
- Yakovleva A.N., A model of vegetation pattern at the Verkhneussuriyskiy Biogeocenotic Station, *Russian J. Ecology*, 2010, Vol. 41, No 4, pp. 307–315.
- Zhu Z., Fu Y., Woodcock C.E., Olofsson P., Vogelmann J.E., Holden C., Wang M., Dai S., Yu Y., Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000–2014), *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 243–257.
- Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh stran. Poyasnitel'nyy tekst i legenda karty* (Zones and types of Russia vegetation and adjacent states. Map explanation and legend), M.: EKOR, 1999, 64 p.