

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОМКНУТОСТИ КРОН РЕДКОСТОЙНЫХ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ ТАЙМЫРА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ РАЗНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2012 г. А. Ю. Тюкавина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: sashatyu@gmail.com

Поступила в редакцию 10.10.2011 г.

По результатам экспедиционных исследований на участке Ары-Мас Таймырского заповедника в рамках международного научного проекта PPS Arctic изучены особенности изображения разреженных лиственничников разной сомкнутости на снимках субметрового и тридцатиметрового пространственного разрешения. По снимкам разного разрешения составлены карты сомкнутости древостоев. Рекомендована методика построения карт сомкнутости древостоев по космическим снимкам с разрешением в десятки метров с использованием детальных полевых схем, снимков субметрового разрешения и зимних снимков.

Ключевые слова: лиственничники лесотундры, кроны деревьев, сомкнутость древостоев, Ikonos, Landsat, участок Ары-Мас, Таймыр

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с повышенным вниманием к проблемам изменения климата активно ведется изучение природных экотонных — переходных зон, обладающих большой неустойчивостью и динамичностью (Бобра, 2006). Лесотундровая зона, представляющая собой экотон “тундра—тайга”, занимает обширные территории севера России и активно вовлекается в хозяйственное использование, что вызывает интерес к процессам, происходящим на границе леса и тундры. Изучению северной границы лесов посвящен международный научный проект PPS Arctic, в рамках которого выполнено данное исследование.

Крайние северные леса в силу своего географического положения слабо доступны для непосредственного исследования, поэтому важную роль в их изучении должны играть материалы дистанционного зондирования (ДЗ). Космические снимки (КС) субметрового пространственного разрешения, на которых в редколесьях различимы отдельные деревья, имеют локальный охват, тогда как менее детальные снимки, с разрешением в десятки метров, в силу большего территориального покрытия позволяют изучать обширные территории. В связи с этим актуальной является разработка методики обоснованного перехода от детальных к более обзорным дистанционным данным, с минимальной потерей достоверности,

присущей “наземной правде” и КС сверхвысокого пространственного разрешения.

В последнее время вопросам изучения и картографирования притундровых лесов по данным ДЗ посвящен ряд исследований как на континентальном уровне (Rees et al., 2008), так и на уровне отдельных регионов: Кольского п-ва (Кравцова, Лошкарева, 2010; Михеева, 2010; Тутубалина, Новичихин, 2010), Урала (Шиятов, Мазепа, 2007; Марушак, Елсаков, 2010), Западного Саяна (Харук и др., 2008), гор северо-востока Китая (Zhang et al., 2009). В частности, в работах, посвященных лиственничникам Таймыра, сделаны попытки оценки сомкнутости и полноты древостоев на основе исследования сочетания освещенных и затененных участков кроны деревьев на снимках сверхвысокого разрешения (Новичихин, Тутубалина, 2010), исследована возможность определения границы тундра-тайга с использованием данных ДЗ, полученных сенсорами с пространственным разрешением 25–500 м (Ranson et al., 2004), изучена тридцатилетняя динамика сомкнутости древостоев по снимкам MSS и ETM+ спутника Landsat и материалам лесной таксации (Харук и др., 2006).

ИССЛЕДУЕМЫЙ РЕГИОН

Участок Ары-Мас Таймырского заповедника находится в южной части Северо-Сибирской низменности, на правом берегу р. Новой (приток р. Хатанга), и представляет собой самый север-

ный в мире лесной остров (72.5° с.ш.), расположенный в окружении тундр, относящихся к южной арктической подзоне. Единственной древесной породой в пределах урочища является лиственница Гмелина, формирующая монодоминантные редкостойные леса и редины (Ары-Мас..., 1978). Сомкнутость редкостойных лиственничных лесов не превышает 0.3–0.4, высота деревьев составляет порядка 4–6 м. Кустарниковый ярус в этих лиственничниках развит слабо: в районе урочища Ары-Мас густой подлесок из кустарниковых форм ольхи, ивы и карликовой березки встречается лишь местами, преимущественно по долинам рек и ручьев. Тундровая растительность, формирующая напочвенный покров лесотундровой зоны, в данном районе носит наномозаичный характер, мозаичность выражена лишь на уровне кочка–межкочечное понижение, отсутствует чередование крупных “пятен” разнотипной тундровой растительности.

Растительность массива Ары-Мас изучена достаточно хорошо, исследования здесь ведутся с конца 1960-х годов (Нурин и др., 1971). В связи с тем, что редкостойные лиственничные леса и редколесья характерны для среднесибирской (котуйско-ленской) и восточносибирской (индигирокольмской) лесотундры в целом, лесной массив Ары-Мас, несмотря на уникальность своего географического положения, может быть взят в качестве эталонной территории для изучения лесотундровой зоны Таймыра.

ПОЛЕВЫЕ ДАННЫЕ

Использованные в работе полевые данные получены в июле 2010 г. в ходе экспедиционных исследований по проекту PPS Arctic на участке Ары-Мас Таймырского заповедника. Комплексные исследования (геоботанические, почвенные, мерзлотные, дендрохронологические, спектрометрические) выполнялись по профилю, заложенному на правом берегу р. Новой, а также на шести пробных площадках (рис. 1). Пробные площадки для детального изучения различных типов растительного покрова были заложены в редкостойном лиственничном лесу (50×50 м), лиственничной редины (50×20 м) и в тундре (10×10 и 20×20 м). На каждой из пробных площадок по квадратам 5×5 или 10×10 м выполнены детальные геоботанические описания, в М 1 : 100 составлены схемы древесного и кустарникового яруса (рис. 2). Для каждого дерева на схеме отмечено положение ствола и зарисована крона по четырем румбам, указано состояние дерева (здоровое, поврежденное, мертвое), измерены высота и диаметр. Кроме того, на полевых схемах древесного яруса отмечены все

единицы лиственничного подроста с указанием высоты и линейного прироста.

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для определения сомкнутости кроны лиственничников в настоящем исследовании использованы КС разного пространственного разрешения: субметрового (Ikonos, разрешение после слияния спектральных каналов с панхроматическим – 0.83 м) и тридцатиметрового (Landsat ETM+). Оба снимка получены в один день, 17.07.2002 г. Дата съемок приходится на вторую половину июля, что гарантирует отсутствие снежного покрова на большей части территории (в это время возможно лишь наличие небольших снежников в тыловых швах склонов северной экспозиции и днищах малых эрозионных форм рельефа) и оптимальную для дешифрирования растительности вегетационную фазу (пик вегетации приходится на конец июля–начало августа). Помимо летних, в работе использован ранневесенний снимок Landsat ETM+ (25.04.2001 г.), наличие снежного покрова на котором дает определенные преимущества при выделении границ распространения лесной растительности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Определение сомкнутости древостоев по снимку Ikonos

На снимке Ikonos субметрового пространственного разрешения различимы отдельные деревья и их тени. При сравнении изображения деревьев на снимке и полевых схем древесного яруса на территорию пробных площадок отмечено, что одна тень на снимке может соответствовать как отдельно стоящему дереву, так и группе деревьев. Это связано с тем, что большинство деревьев в данном районе произрастают био группами, а не поодиночке. Таким образом, невозможно лишь по снимку, без наземных наблюдений, достоверно установить количество деревьев на определенной площади. Кроны лиственниц маломощны, по снимку визуальнo плохо отделяются от ярких пикселей, соответствующих напочвенному покрову или подросту. Поэтому дешифрировать деревья по прямым яркостным признакам с достаточной уверенностью не удастся. В то же время на снимке четко отображаются падающие тени деревьев, вытянутые в противосолнечном направлении и имеющие яркость существенно ниже освещенного напочвенного покрова.

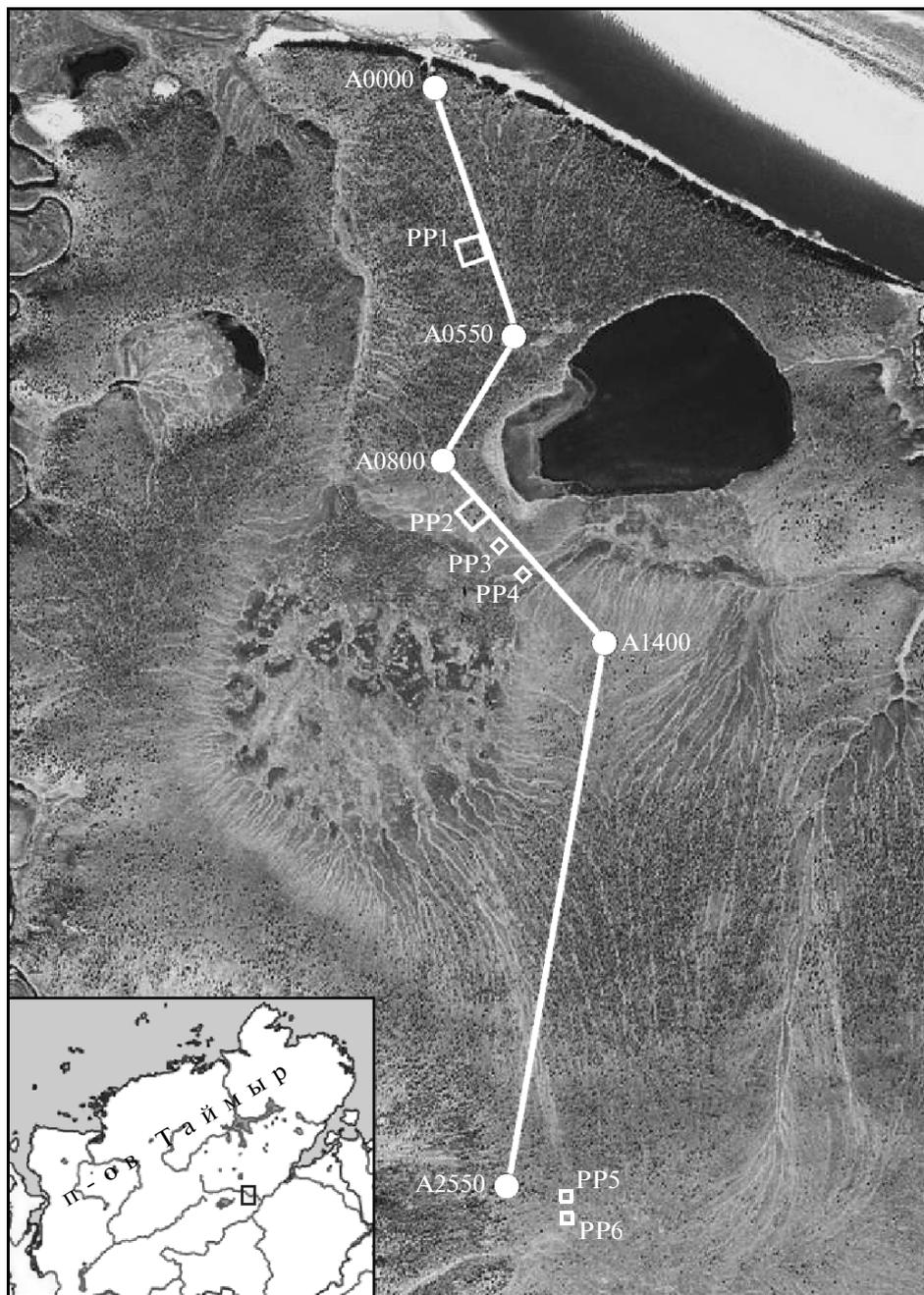


Рис. 1. Географическое положение участка исследований: A0000–A2550 – комплексный профиль, PP1–PP6 – пробные площадки.

По хорошо выделяющимся на снимке теням деревьев можно оценить сомкнутость крон разреженных лиственничников. Для этого необходимо знать соотношение между реальной сомкнутостью крон и площадью теней на снимке (рис. 3). Следует отметить, что определение сомкнутости крон по их теням достоверно лишь в том случае, когда длина тени отдельной био группы деревьев меньше среднего расстояния между соседними

био группами. При оценке сомкнутости древостоев по снимку Ikonos за реальную сомкнутость крон была принята доля площади (в %) четырехугольников, изображающих кроны на полевых схемах древесного яруса, от площади пробной площадки. Изображение крон деревьев, имеющих сложную, неправильную форму в плане, четырехугольниками носит большую долю условности. Чтобы свести к минимуму ошибку, возника-

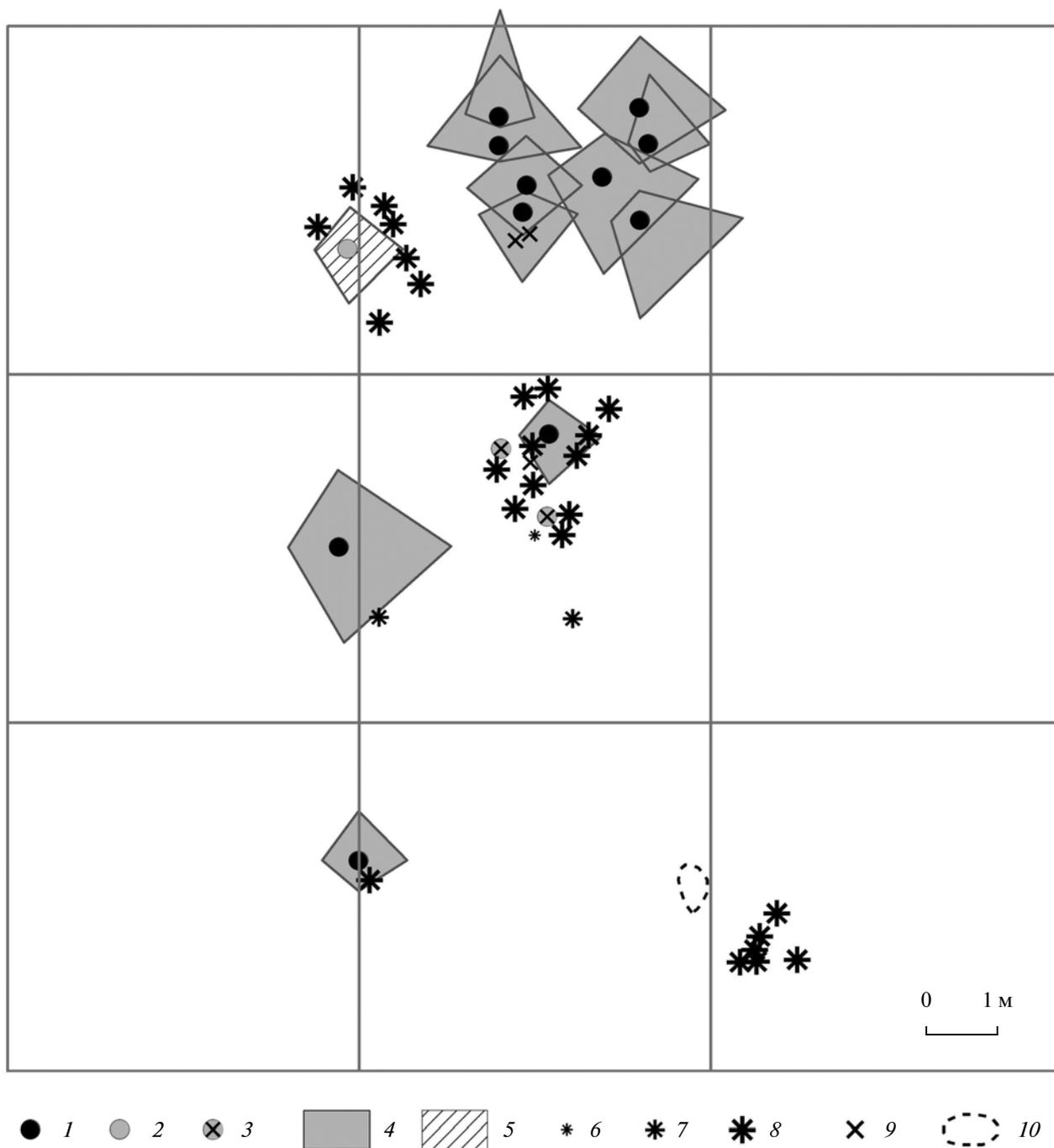


Рис. 2. Фрагмент схемы древесного яруса редколесной пробной площадки РР5. Стволы лиственницы: 1 – здоровой, 2 – поврежденной, 3 – мертвой; кроны лиственницы: 4 – здоровой, 5 – поврежденной; подрост лиственницы, высотой (см): 6 – менее 15, 7 – 15–50, 8 – 50–200; 9 – пни; 10 – лиственничный стланник.

ющую вследствие аппроксимации формы кроны четырехугольником, измерения размаха кроны в пределах каждой пробной площадки выполнялись однообразно, в направлениях, соответствующих ориентировке площадки. Кроме того, в изображении кроны на схемах не учитывается

ажурность кроны, уменьшающая их проективное покрытие. Поэтому можно считать, что сомкнутость лиственничных кроны на схемах древесного яруса немного завышена по сравнению с реальной. Более точные полевые оценки сомкнутости кроны можно было бы получить путем наземного

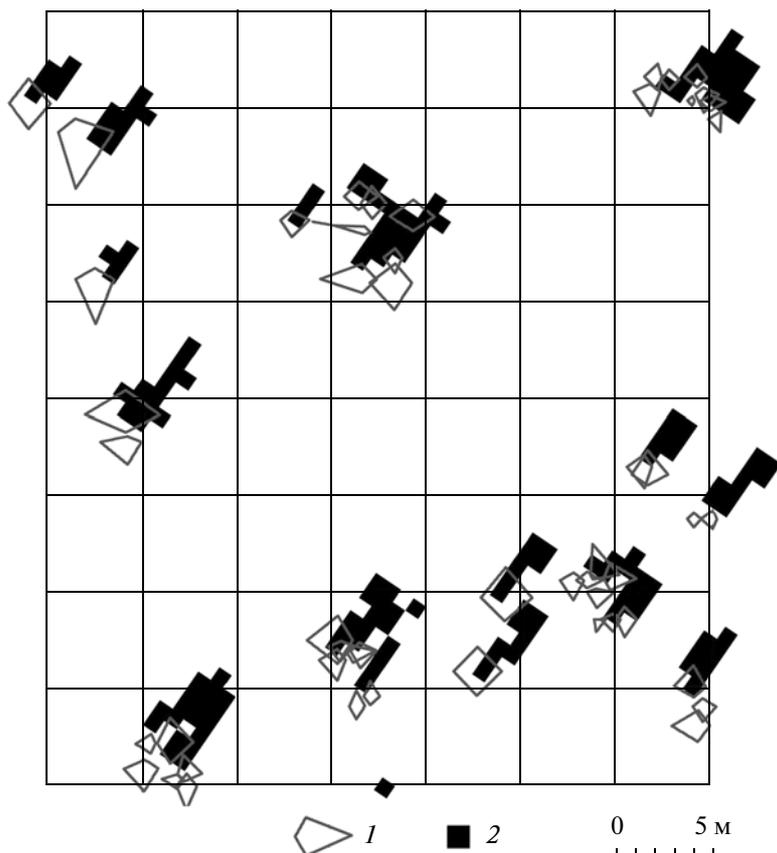


Рис. 3. Кроны лиственниц по данным полевой схемы древесного яруса площадки PP2 и тени деревьев со снимка Ikonos (17.07.2002).

фотографирования вертикально вверх и последующего выделения на фотографиях пикселей, относящихся к кронам деревьев и к участкам неба. Работы по наземному фотографированию крон объективом “рыбий глаз” были выполнены в рамках экспедиции, однако полученные данные находятся на этапе обработки. В связи с этим в данной работе за эталонные значения сомкнутости крон принимались менее точные оценки, выполненные по полевым схемам.

Вычисление соотношения площади теней и сомкнутости крон проводилось на основе схем древесного яруса двух пробных площадок (лесной PP1 и редколесной PP2) и контуров теней, выделенных в результате обработки снимка Ikonos по методике, описанной в работе (Новичихин, Тутубалина, 2010). Всего в расчетах участвовало порядка 150 деревьев. В результате для данных условий съемки (17 июля 2002 г., высота Солнца 38.3°) было получено соотношение между площадью теней и площадью проекций крон, равное 2.1 : 1. Соотношение не универсально, однако при наличии снимков субметрового разрешения на данную территорию, но на другие даты, позволяет

вывести общую зависимость между сомкнутостью крон (долей проекций крон в единице площади), площадью теней на снимке и высотой солнца в момент съемки (указывается в метаданных снимка).

На основе полученного эмпирического соотношения между площадью теней на снимке и сомкнутостью крон, по классу теней со снимка Ikonos была построена схема сомкнутости древостоев. Каждому пикселу снимка Ikonos присваивалось значение, соответствующее доле теней в пределах окна со сторонами 30×30 м (что соответствует размеру пиксела снимка Landsat), центром которого является данный пиксел. Размер окна может быть любым, но не должен быть меньше среднего расстояния между деревьями. В противном случае доля площади теней в пределах окна будет отражать не сомкнутость древостоя, а попадание окна в пределы/за пределы тени. После деления значений доли площади теней для каждого пиксела снимка Ikonos на 2.1 были получены значения сомкнутости крон. Разбив их на интервалы через 5% (0.05), мы получили возможность создать схему сомкнутости древостоев (рис. 4).

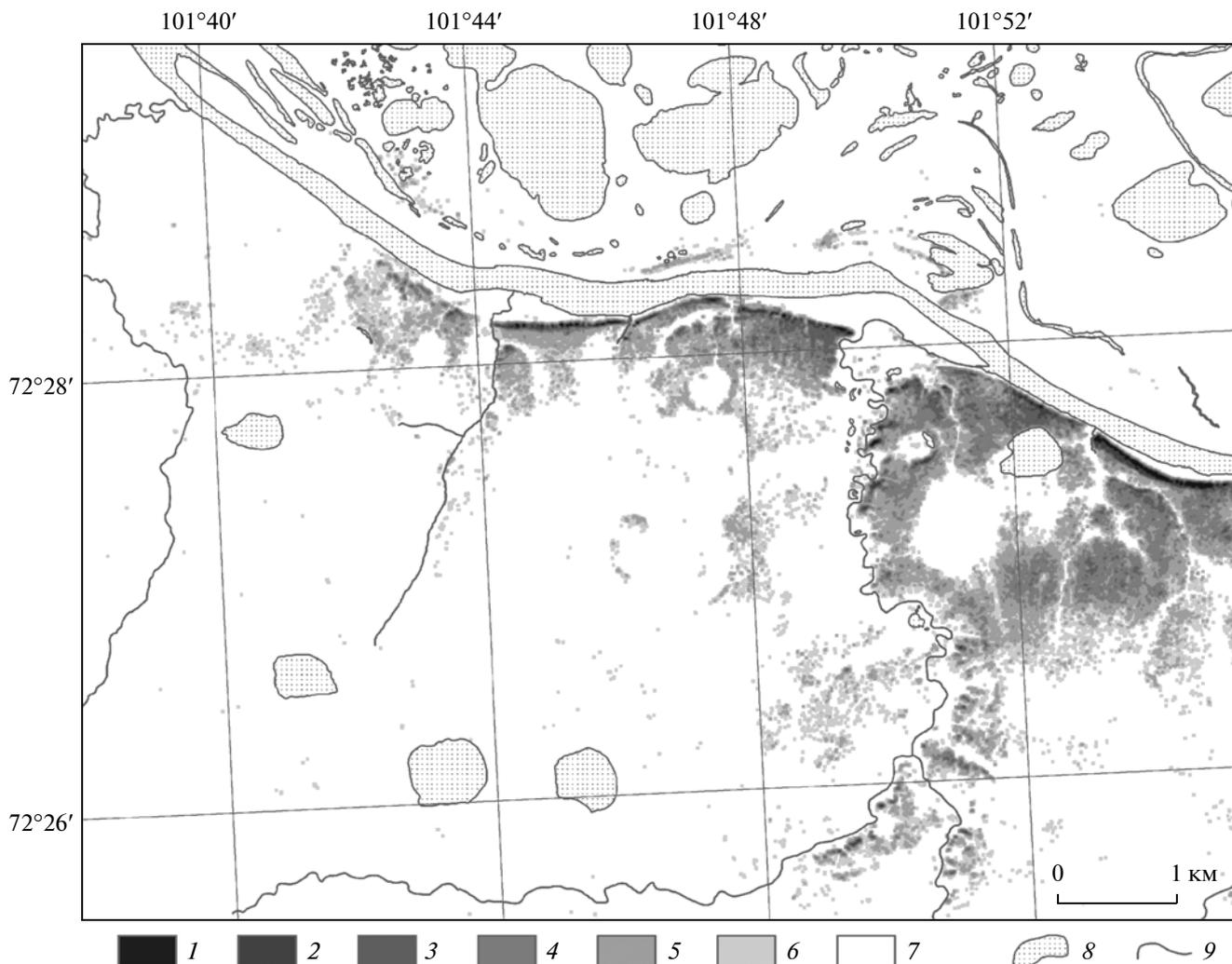


Рис. 4. Схема сомкнутости древостоев на урочище Ары-Мас по снимку Ikonos (17.07.2002). Сомкнутость кроны лиственничников: 1 – более 0.2; 2 – 0.15–0.2; 3 – 0.1–0.15; 4 – 0.05–0.1; 5 – 0.01–0.05; 6 – менее 0.01; 7 – 0 (безлесные территории). 8 – Озера и крупные реки; 9 – реки.

Преимущество составленной схемы в том, что она отражает положение границы распространения отдельных деревьев. Это обусловлено характером методики ее построения: если в пределы скользящего окна 30×30 м при обработке попала тень хотя бы одного дерева, весь участок 30×30 м будет отнесен к классу редколесий с минимальной сомкнутостью. Таким образом, не происходит потери отдельных деревьев, не учитывающихся при иных способах оценки сомкнутости кроны. Однако в автоматическом определении сомкнутости кроны по площади теней есть и существенные погрешности. Так, помехами, приводящими к ошибкам в определении сомкнутости кроны, являются тени иного происхождения (не тени деревьев), присутствующие на маске теней, полученной по снимку Ikonos. Это тени крупных бугров пучения на болотах, тени от уступов по бере-

гам рек и озер, тени изрезанных фасеточных склонов. Эти тени требуют ручной фильтрации, предшествующей процессу обработки маски теней скользящим окном.

Определение сомкнутости древостоев по снимкам Landsat ETM+

В отличие от снимка Ikonos с субметровым пространственным разрешением, на котором различимы кроны отдельных деревьев, их тени и различные типы напочвенного покрова, каждый из тридцатиметровых пикселей снимка Landsat ETM+ содержит в себе интегральный спектральный образ объектов, попадающих на площадку 30×30 м. Невозможность различить отдельные деревья на снимках с тридцатиметровым разрешением затрудняет определение положения границы лесов и делает

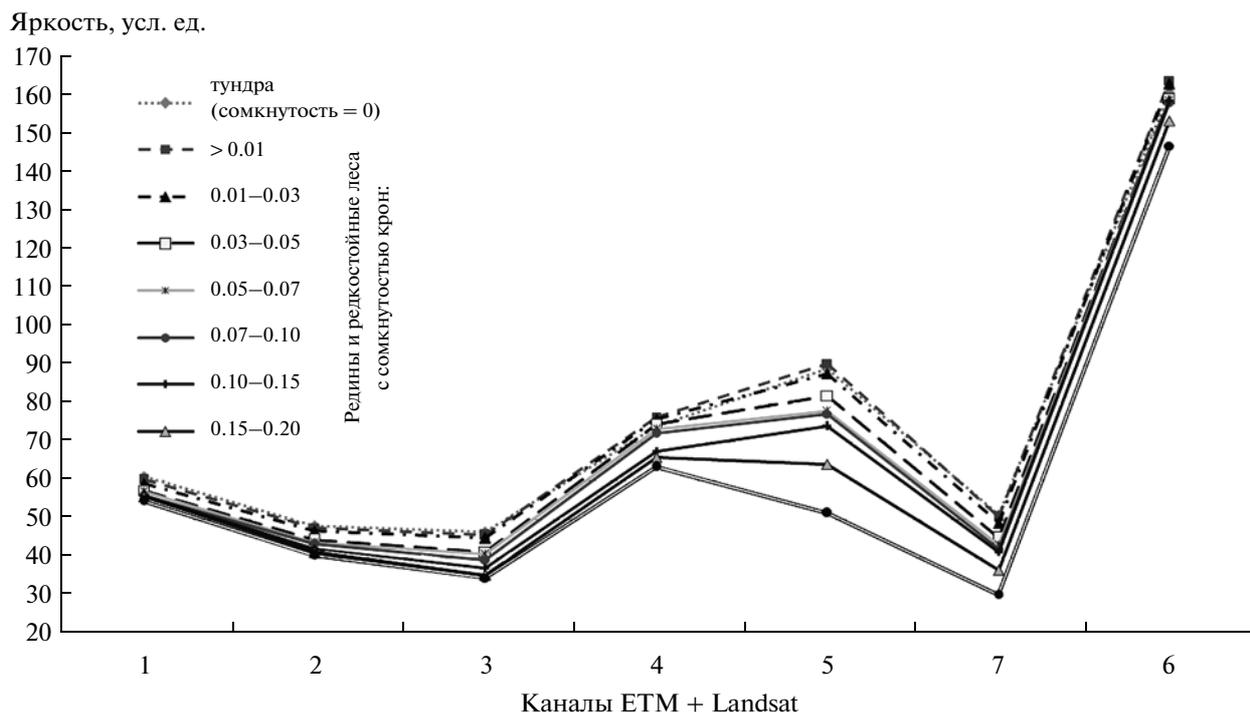


Рис. 5. Кривые спектральной яркости для тундры, редины и разреженных лиственных лесов, полученные по снимку Landsat ETM+, 17.07.2002.

невозможным определением границы произрастания отдельных деревьев. В данном районе на границе произрастания отдельных деревьев высота лиственных не превышает 3 м, а размах крон – 1.5 м. Одна-две таких лиственницы, попавшие в пределы пиксела на снимке Landsat, могут не внести достаточного вклада в спектральный образ пиксела, чтобы отличить его от пикселей тундры. В связи с этим при оценке сомкнутости крон по снимкам с разрешением в десятки метров, таким, как Landsat ETM+, не может быть применен подход, использованный для снимка сверхвысокого разрешения и основанный на непосредственном подсчете площади, занимаемой тенями деревьев на снимке.

Для количественной оценки сомкнутости древостоев в районе урочища Ары-Мас по снимкам Landsat ETM+ необходимо в первую очередь определить порог сомкнутости крон, при котором редины начинают отличаться от тундр на снимке Landsat. На основе рассчитанных по снимку Ikonos значений сомкнутости древостоев на снимке Landsat ETM+ (в области перекрытия снимков Ikonos и Landsat) выбирались по три пиксела, соответствующие редины и редкостойным с сомкнутостью крон менее 0.01; 0.01–0.03; 0.03–0.05; 0.05–0.07; 0.07–0.1; 0.1–0.15; 0.15–0.2; 0.2–0.25. Таким образом, было отобрано 24 пиксела снимка Landsat, представляющих разные ти-

пы редины и разреженных лиственных лесов по сомкнутости крон. Для тундры также отобрано три эталона в разных частях снимка Landsat, но каждая из эталонных выборок включала по 100 пикселей. Эталоны выбирались на ровных участках тундры, за пределами переувлажненных ложбин, заросших осокой, карликовой березкой и ивой, и хорошо отделяющихся на снимке от лесов и редины (при варианте синтеза 4–3–2 имеют ярко-розовый цвет). Для каждой из выборок по девяти классам (тундра и восемь типов редины и редкостойных лесов) по снимку Landsat ETM+ были получены средние значения яркости в каждом из семи спектральных каналов (исключая восьмой, панхроматический). Полученные кривые спектральной яркости приведены на рис. 5. Анализ кривых показывает, что во всех каналах видимого диапазона (канал 1 – голубой, канал 2 – зеленый, канал 3 – красный), а также в среднем ИК-диапазоне (канал 5: 1.55–1.75 мкм; канал 7: 2.08–2.35 мкм) редины с сомкнутостью крон менее 0.01 и 0.01–0.03 не отделяются от тундр; заметно начинают отделяться от тундр лишь редины с сомкнутостью крон более 0.03. В ближнем ИК-диапазоне (канал 4: 0.76–0.90 мкм) практически неразличимы тундры и редины с сомкнутостью менее 0.1. Тепловой канал 6 мало информативен для отделения лесной растительности от тундр и разделения ее на классы сомкнутости. Таким образом, редины с

сомкнутостью кроны менее 0.03 не отделяются значительно ни в одном из спектральных каналов от тундры, их разделение по снимкам Landsat ETM+ невозможно.

Средний ИК-канал 5, в котором различия в яркости между лесами различной сомкнутости максимальны, наиболее подходит для разделения древесной растительности по классам сомкнутости. В связи с этим для дешифрирования древесной растительности экотона тундра-тайга в окрестностях Ары-Маса наиболее целесообразно использовать варианты синтеза с участием пятого, среднего ИК-канала снимка Landsat, и каналов видимого диапазона (например, 5–3–2, 2–5–3, 3–2–5) вместо традиционно используемого варианта 4–3–2 с участием ближнего ИК-канала.

На основании кривых спектральной яркости, приведенных на рис. 5, а также привлечения дополнительных эталонов для каждого из классов сомкнутости древостоев разработана шкала соответствия яркости в канале 5 снимка Landsat (17.07.2002) и сомкнутости редколесий и разреженных лиственничных лесов (таблица).

Маскирование нелесных территорий на снимке Landsat ETM+

Для того чтобы составить схему сомкнутости древостоев, аналогичную созданной ранее по снимку Ikonos, но охватывающую большую территорию, необходимо выделить на снимке Landsat леса и редины с сомкнутостью более 0.03, отделив их от нелесных территорий (тундра, болот, водных объектов, участков открытого грунта и пр.). Однако при попытке классификации летнего снимка Landsat (17.07.2007) в класс лесов попадают и заболоченные полигональные тундры.

Известно, что для выделения границ лесной растительности и разделения различных типов лесов в ряде случаев целесообразно использование зимних КС (Кравцова, Салахетдинова, 1988; Такао, 2002). В нашей работе для разделения лесных и нелесных территорий привлечен зимний, а точнее, поздневесенний снимок Landsat ETM+, полученный 25 апреля 2001 г. Большая часть территории на снимке покрыта снегом, за исключением небольших озер, уже свободных ото льда, и полыней на реках (в том числе р. Новая и Хатанга). Полигональные заболоченные тундры, спектральный образ которых из-за чередования пониженных, переувлажненных участков, небольших озерков и бугров на летнем снимке близок к спектральному образу лиственничных редины и редколесий, в апреле еще покрыты снегом, маскирующим их полигональный характер. Поэтому на апрельском снимке полигональные тундры изображаются

Соответствие между яркостью в канале 5 Landsat ETM+ и сомкнутостью разреженных лиственничников

Яркость, условные единицы (канал 5, Landsat ETM+, 17.07.2002)	Сомкнутость древостоев
>60	>0.2
60–75	0.1–0.2
75–80	0.05–0.1
>80	<0.05

так же, как и тундры с ровной поверхностью. Сравнительный визуальный анализ летнего и зимнего снимков показал, что древесная растительность различима на зимнем снимке при такой же сомкнутости кроны, что и на летнем (порядка 0.03), но контуры лесов отчетливее, контрастнее выделяются на фоне однородного изображения покрытых снегом влажных полигональных и сухих тундр.

Для создания маски нелесных территорий по апрельскому снимку с помощью контролируемой классификации методом максимального правдоподобия выделены два класса: лесная растительность и безлесные территории. Эталоны для классификации выбирались с таким расчетом, чтобы наряду с основным массивом лесов в долине р. Хатанга в класс “леса” попали участки древесной растительности даже с невысокой (0.03–0.05) сомкнутостью, играющие ключевую роль в изучении границы лесной растительности. Особое внимание уделялось “острову леса” в районе урочища Ары-Мас, обеспеченному снимками сверхвысокого разрешения и полевыми данными. В результате классификации к классу лесной растительности оказались ошибочно отнесены участки полыней на реках. Для того чтобы исключить реки из класса лесов, проведена неконтролируемая классификация летнего, июльского снимка Landsat, с выделением 20 классов, один из которых включал водные объекты. Затем выполнено вычитание класса водных объектов, выделенного по летнему снимку, из класса лесов, выделенных по апрельскому снимку. Таким образом, получена маска нелесных территорий, на которой каждому пикселу соответствует значение 1 (лес) или 0 (безлесная территория). Полученная маска нелесных территорий наложена на исходный снимок Landsat ETM+ 17.07.2002 в Erdas Imagine Model Maker: значения яркости пикселов, относящихся к классу нелесных территорий, заменены на 0. Это позволило при построении карты сомкнутости древостоев анализировать снимок Landsat лишь в пределах класса “лесная растительность”.

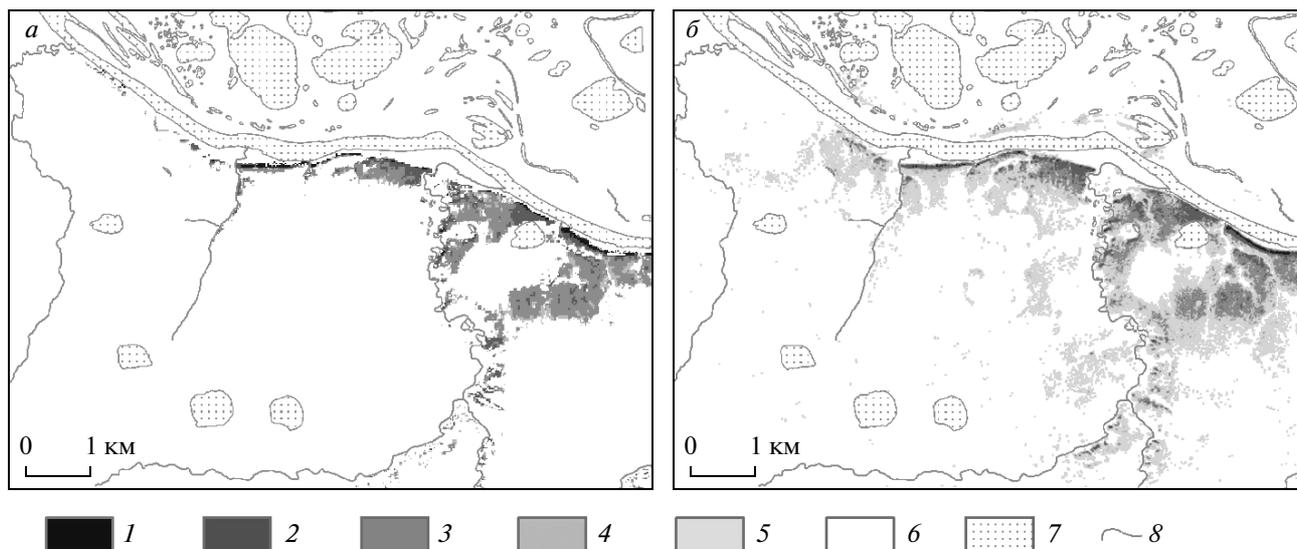


Рис. 6. Сомкнутость древостоев массива Ары-Мас, рассчитанная по снимкам: *a* – Landsat ETM+ (17.07.2002); *б* – Ikonos (17.07.2002). Редины и редкостойные леса с сомкнутостью кроны: 1 – более 0.2; 2 – 0.1–0.2; 3 – 0.05–0.1; 4 – 0.03–0.05; 5 – менее 0.03; 6 – 0 (безлесные территории). 7 – Водные объекты; 8 – реки.

Карта сомкнутости древостоев по снимку Landsat ETM+

На основе выявленной зависимости между яркостью в среднем ИК-диапазоне и сомкнутостью разреженных лиственничников (таблица) по снимку Landsat ETM+ составлена карта сомкнутости древостоев на район р. Хатанга. Ценность построенной карты сомкнутости древостоев на территорию бассейна р. Хатанга заключается в том, что количественная оценка сомкнутости по снимку Landsat основана не на разрозненных геоботанических описаниях, не имеющих строгой пространственной привязки, а на последовательном переходе от данных крупномасштабного полевого картографирования к снимкам сверхвысокого, а затем и относительно высокого разрешения.

В соответствии с составленной картой, наиболее сомкнутые древостои (>0.2) распространены по поймам рек, что может быть обусловлено наличием густых зарослей кустарниковых форм ольхи и ивы в подлеске. В центральных частях лесных массивов в основном преобладают древостои с сомкнутостью 0.1–0.2, что несколько ниже традиционных оценок сомкнутости кроны для данной территории (0.2–0.4), приведенных в (Тюлина, 1996). Возможно, это обусловлено тем, что большая часть геоботанических описаний в ходе экспедиций выполняется вблизи рек, где сомкнутость древостоев максимальна, а также склонностью человека к завышению сомкнутости кроны при полевых геоботанических описаниях. В крайних частях массивов леса, на границе с тундрами,

сомкнутость кроны закономерно снижается, значительная часть древостоев с сомкнутостью менее 0.05 приурочена именно к переходной зоне между разреженными лесами и тундрой.

Для массива Ары-Мас, который служил эталоном при построении данной карты, общая картина распределения древостоев различной сомкнутости совпадает с полученной ранее по снимку Ikonos (рис. 6б), что является показателем достоверности предлагаемой методики построения карты сомкнутости древостоев по снимкам тридцатиметрового разрешения. Различия между двумя изображениями вызваны разницей в пространственном разрешении исходных материалов (30 и 0.83 м), а также тем, что при построении карты сомкнутости древостоев по снимку Landsat (рис. 6а) в класс лесов не вошли лиственничные редины с сомкнутостью менее 0.03.

В общем виде методика построения карты сомкнутости древостоев по снимкам с пространственным разрешением в десятки метров может быть представлена в виде поэтапной схемы (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная выше методика может быть применена и для других районов лесотундровой зоны, где лесотундровую растительность формируют разреженные лиственничники. В качестве исходных данных может использоваться сочетание любых многозональных КС субметрового разрешения и КС с разрешением в десятки метров.

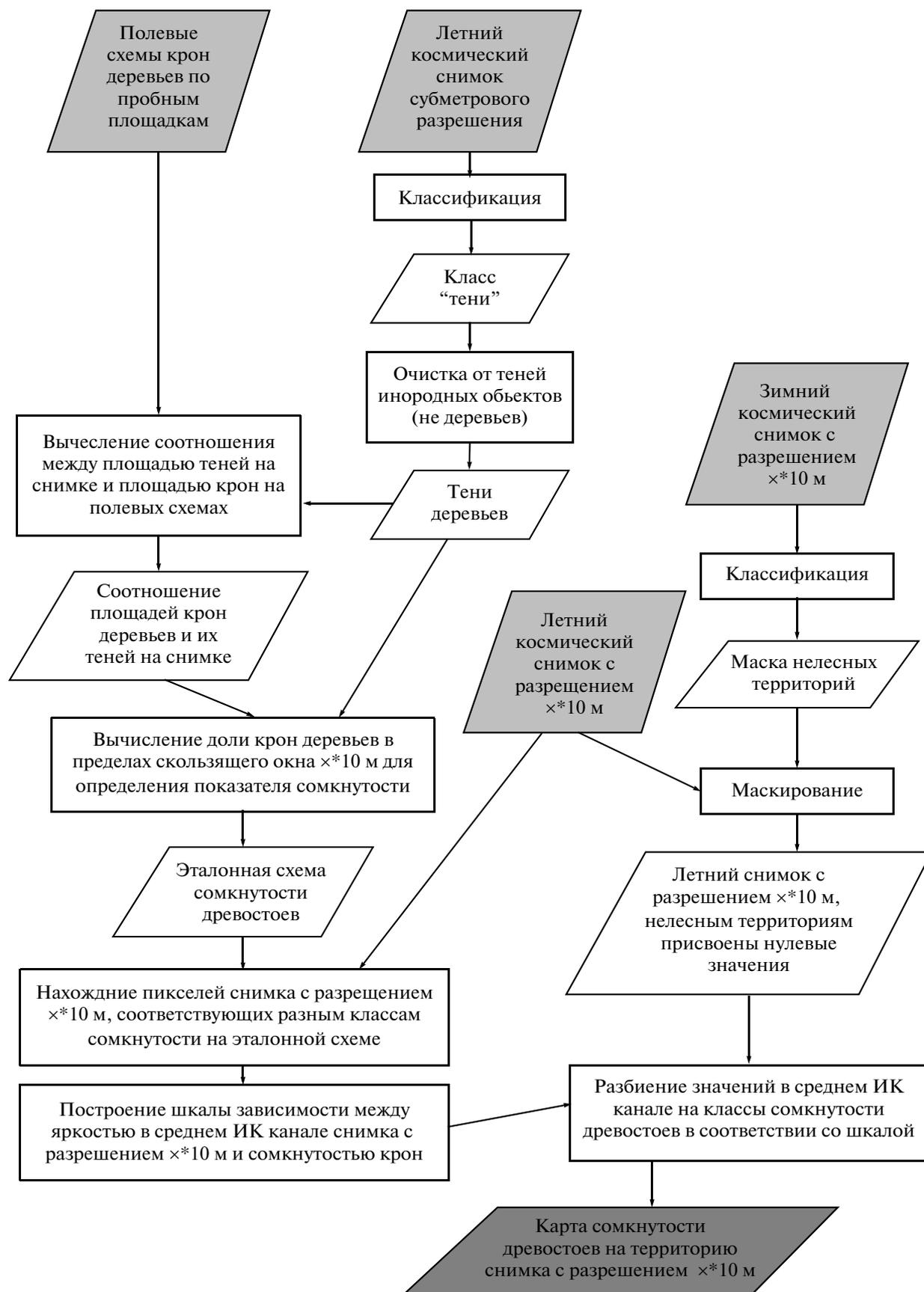


Рис. 7. Поэтапная схема создания карты сомкнутости древостоев по КС пространственного разрешения в десятки метров.

Оригинальность предложенных в настоящей работе методических разработок обусловлена совместным использованием крупномасштабных полевых схем древесного и кустарникового ярусов и КС субметрового разрешения. Возможность количественной оценки сомкнутости крон древостоев обеспечена непосредственным подсчетом площади, занимаемой тенями деревьев на снимке, вместо использования традиционных классификаций изображения по спектральным признакам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ары-Мас. Природные условия, флора и растительность самого северного в мире лесного массива. Л.: Наука, 1978. 192 с.
- Бобра Т.В. К вопросу о понятиях “Граница”—“Экотон”—“Геозотон” в географии // Культура народов Причерноморья. 2006. № 79. С. 7–12.
- Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Оценка дешифрируемости растительности на космических снимках 30-метрового разрешения на основе детальных космических снимков // Геодезия и картография. 2010. № 8. С. 33–41.
- Кравцова В.И., Салахетдинова Е.Р. Изучение и картографирование лесов по материалам зимней сканерной съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 1. С. 56–65.
- Маруцак И., Елсаков В. Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов Приполярного Урала // Вестн. Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. Т. 6. № 152. С. 18–22.
- Михеева А.И. Пространственная изменчивость положения верхней границы леса в Хибинах по материалам дистанционного зондирования // Вестн. МГУ. Сер. География. 2010. № 4. С. 18–22.
- Новичихин А.Е., Тутубалина О.В. Дешифрирование древостоев по детальным космическим снимкам: методика выделения объектов, карты пространственной структуры. Lambert Academic Publishing, 2010. 129 с.
- Тутубалина О.В., Новичихин А.Е. Интеграция алгоритмов обработки космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для автоматизированного дешифрирования лесной растительности // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2010. № 3. С. 40–42.
- Тюлина Л.Н. Лесная растительность Хатангского района у ее северного предела. СПб.: НПО Мир и семья-95, 1996. 144 с.
- Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т., Рэнсон К.Дж. Древесная растительность экотона лесотундры Западного Саяна и климатические тренды // Экология. 2008. № 1. С. 10–15.
- Харук В.И., Рэнсон К.Дж., Им С.Т., Наурызбаев М.М. Лиственничники лесотундры и климатические тренды // Экология. 2006. № 5. С. 323–331.
- Шиятов С.Г., Мазена В.С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. 2007. № 6. С. 11–22.
- Ranson K.J., Sun G., Kharuk V.I., Kovacs K. Assessing tundra—taiga boundary with multi-sensor satellite data // Rem. Sens. Environ. 2004. № 93. P. 283–295.
- Rees G., Tutubalina O., Tømmervik H., Zimin M., Mikheeva A., Golubeva E., Dolan K., Hofgaard A. Mapping of the Eurasian forest—tundra transition zone by remote sensing // Proc. CB-VM Meeting. 3–6 November 2008. Helsinki, Finland. 2008. P. 303–310.
- Takao G. Forest disturbances in Far East Russia detected by winter satellite images // Proc. Japanese Conf. Rem. Sens. 2002. V. 33. P. 253–254.
- Zhang Y., Xu M., Adams J., Wang X. Can Landsat imagery detect tree line dynamics? // Int. J. Rem. Sens. 2009. № 5–6. P. 1327–1340.

Estimation of Tree Crown Density in Sparse Larch Forests of Taimyr Peninsula with Multiresolution Satellite Images

A. Yu. Tyukavina

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

Using the results of field research in Ary-Mas site of State Nature Biosphere Reserve “Taimyrsky” within international scientific project PPS Arctic we studied the representation of sparse larch forests of different density on satellite images with spatial resolution of 1 m and 30 m. Maps of tree crown density were compiled on the basis of multiresolution images. We proposed the methods of tree crown density mapping, including satellite images with resolution of tens of meters, very high resolution images (less than 1 m), field tree crown schemes and winter satellite images.

Keywords: forest-tundra larch forests, tree crowns and shadows, tree crown density, satellite images, Ikonos, Landsat, Ary-Mas site, Taimyr