

DOI

УДК 528.88

**ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ФИТОМАССЫ ЛЕСНЫХ ПОРОД ПО
СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВЫСОКОГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АО)**

© 2018 г. Е.Н. Сочилова¹, Н.В. Сурков^{1,2}, Д.В. Ершов¹, В.А. Хамедов³

¹*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32 стр. 14

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

³*Югорский государственный университет*

Россия, 628012, Ханты-Мансийск, Чехова ул., 16

E-mail: elena@ifi.rssi.ru

Поступила в редакцию 30.10.2018 г.

Настоящая работа посвящена оценке запасов фитомассы верхнего полога древостоя по спутниковым разносезонным изображениям высокого пространственного разрешения Landsat-8 и выборочным данным лесной таксации. Тестовый участок выбран на территории Ханты-Мансийского автономного округа. По спутниковым данным автоматически методом сегментации выделяются спектрально-однородные участки земной поверхности для оценки в них категории земель, преобладающей породы, возраста и запаса древостоя. С использованием таксационных данных по преобладающим породам составляются выборки сегментов для обучения классификатора и для контроля результатов. На первом этапе выполняется классификация территории на 9 типов наземного покрова, четыре из которых покрыты лесными сообществами с преобладающими породами (сосна, кедр, ель, береза). Эталонная выборка дополняется сегментами нелесных классов: гари, вырубки, другие, не покрытые лесом земли, болота, водоемы. Для классификации используются 12 спектральных признаков: отражательная способность в синем, зелёном, красном и ближнем инфракрасном каналах Landsat-8 за разные сезоны: конец зимы, начало весны и середина лета. Наиболее значимыми информативными признаками являются яркости в БИК-канале весеннего изображения, зелёном и красном каналах летнего изображения. Управляемая классификация наземного покрова выполняется методом Random Forest, интегральная точность - 86.3%. Перекрестная проверка результатов классификации по контрольной выборке составила 0.712. На втором этапе для оценки запаса древесины и среднего возраста лесных насаждений проводится построение регрессионных зависимостей между значениями яркости в зимнем красном канале с лесотаксационными характеристиками (запасом стволовой древесины и высотой) на отобранных эталонных сегментах. Уровень взаимосвязи между яркостями зимнего канала и запасами составил 0.80 для сосны, 0.56 для темнохвойных пород и 0.73 для берёзы; между яркостями зимнего канала и высотой – 0.75 для сосны, 0.61 для березы, 0.64 для темнохвойных пород. В результате проверки ошибка определения запаса свыше 250 м³/га для березы составила 15.4%, для сосны – 19.0%, для темнохвойных пород – 5.5%. Восстановленные по уравнениям регрессии средние высоты используются для определения

средних возрастов насаждений по таблицам хода роста. Выделяются группы возраста для каждой породы и выполняется перерасчёт запасов древесины в фитомассу по конверсионным коэффициентам. В результате созданы карты средних возрастов, высот, запасов древостоя в м³/га и фитомассы в т/га. На основе карт проведены поквартальные оценки площадей и запасов основных лесобразующих пород тестовой территории, включая лесные участки, соответствующие возрасту рубки.

Ключевые слова: *фитомасса насаждений, запасы стволовой древесины, данные дистанционного зондирования, Landsat-8, классификация лесов, Random Forest, лесное хозяйство*

Комбинация разносезонных и разновременных изображений с данными лесной таксации позволяет актуализировать пространственную информацию о распределении на исследуемой территории основных категорий земель и преобладающих древесных пород, а также выявить последние изменения, связанные с пожарами, рубками и другими воздействиями на леса. Настоящая работа посвящена изложению методики и результатов пространственной оценки запасов фитомассы верхнего полога древостоя по спутниковым разносезонным изображениям высокого пространственного разрешения Landsat-8 и выборочным данным лесной таксации. Участок для исследований выбран на территории Советского лесничества Ханты-Мансийского автономного округа.

Согласно сложившимся представлениям существуют взаимосвязи между характеристиками отражательной способности в различных спектральных диапазонах и некоторыми свойствами растительного покрова (Виноградов, 1984; Poso et al., 1987), в частности – таксационными характеристиками древесных насаждений. Среди выявленных закономерностей упоминается наличие связи между отражательной способностью в красном диапазоне спектра и запасами стволовой древесины на изучаемой территории (Kuusela, Poso, 1970). В этой работе также предложено использовать обозначенную закономерность для оценки запасов древесины и указано, что лучшие результаты достигаются зимой, при отсутствии лиственного покрова. Широкое развитие подобные исследования получили после начала поступления массовых и однотипных данных со спутников серии Landsat в 1972 г. в США и Северной Европе. Эти данные широко применялись для получения таких характеристик древостоя, как высота, проективное покрытие и индекс листовой поверхности (LAI – leaf area index) (Hall et al., 2003; Zhang et al., 2014). Многие исследования были направлены на получение информации об объёме зелёной биомассы и продуктивности сообществ (Name et al., 1997; Hall et al., 2006; Ji et al., 2012; Zhang et al., 2014). Большой интерес представляет использование данных оптического ДЗЗ для количественной оценки запасов лесных горючих материалов (Arroyo et al., 2008; Gharun et al., 2017) или объёма стволовой древесины в целях лесозаготовок (Fazakas et al., 1999; Zheng et al., 2014), однако

подобное применение данных такого типа встречается значительно реже. Информация о насаждениях, получаемая в ходе наземных исследований, может использоваться как для построения моделей дистанционной оценки запаса древесины (Tokola, 2000; Hall et al., 2006; Chirici et al., 2008; Mura et al., 2018), так и для проверки точности полученных результатов (Tokola, Heikkilä, 1997; Halme, Tomppo, 2001). В России больше внимания уделяется применению данных оптического диапазона ДЗЗ для классификации породного состава лесов, но есть работы и по оценке запаса древесины, например, в южной части Валдайской возвышенности (Козлов и др., 2007), где вместе с данными Landsat-5 и Landsat-7 применена цифровая модель рельефа, в Красноярском крае по данным Landsat-7 (Сочилова, Ершов, 2012) и в Приморском крае по данным спутника PROBA-V среднего пространственного разрешения (Жарко и др., 2018).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Изучаемая территория площадью 2300 км² находится в пределах Советского района Ханты-Мансийского автономного округа, к востоку от пос. Агириш, к северу от райцентра – г. Советский и к юго-востоку от заповедника «Малая Сосьва». В границы области исследования попадают части трёх участковых лесничеств – Торского, Эсского и Зеленоборского, которые являются подразделениями Советского лесничества. В физико-географическом отношении территория расположена в пределах Западно-Сибирской равнины, на южных отрогах Северо-Сосьвинской возвышенности с абсолютными высотами до 233 м, приуроченных к поднятию Малососьвинского амфитеатра. Через эти отроги проходит водораздел бассейнов рек Северная Сосьва (впадает в Обь) и Конда (впадает в Иртыш). Наименьшие отметки уреза воды находятся на абсолютной высоте 72 м. Рельеф западной части территории – возвышенная холмисто-увалистая моренная равнина, с глубоко врезанными долинами притоков р. Эсс. Восточная часть – это плоская флювиогляциальная равнина, степень расчленения которой гораздо ниже (Гвоздецкий, Михайлов, 1978).

Климат изучаемой территории континентальный, достаточно влажный, летом во многом определён западным циклоническим переносом атлантических воздушных масс, зимой – азиатским континентальным антициклоном. Средние температуры января – около минус 18⁰С, июля - плюс 17.5⁰С. Безморозный период длится 90 дней. Осадков выпадает до 500 мм в год, но в силу плоского рельефа и плохого дренажа велика заболоченность (Географические условия..., 2018).

Изучаемая территория принадлежит к Северо-Сосьвинской ландшафтной провинции северо-таёжной лесоболотной зоны Западно-Сибирской равнины. Лесистость территории Советского лесничества равна 76% (Лесохозяйственный регламент..., 2018). Наи более

типичны сосновые леса с примесью лиственницы, зеленомошные и кустарничковые. Они часто имеют небольшую (8-12 м) высоту и разреженный полог, могут переходить в заболоченные редколесья. Доля сосновых лесов в Советском лесничестве составляет 74%, в них проводятся активные лесозаготовки. На дренированных склонах речных долин встречаются елово-кедровые насаждения, занимающие менее 10% площади. В пределах плоских частей междуречий значительна доля берёзовых лесов с примесью осины и сосны, зачастую тоже переувлажнённых. Кроме лесов, большие площади заняты сфагновыми верховыми болотами (Атлас лесов..., 1973, Гвоздецкий, Михайлов, 1978).

В качестве исходных материалов используются безоблачные сцены Landsat-8/OLI с пространственным разрешением 30 м за разные сезоны: конец зимы (23.02.2014), начало весенней вегетации (19.05.2016) и середина лета (20.06.2016) (рис. 1). Для решения поставленных задач применяются результаты съёмки в синем, зелёном, красном и ближнем инфракрасном каналах. Значения спутниковых данных сводятся к единому знаменателю. Это достигается за счет преобразования данных в абсолютные безразмерные значения отражения (reflectance) в диапазоне от 0 до 1, которые характеризуют отношение количества поступившего на объект потока солнечных лучей и количество света им отраженного (Markham, Barker, 1986; Белова, Ершов, 2012). Особое внимание в работе уделено применению зимней съёмки в красном канале для оценки запасов насаждений за счет интенсивности отраженных от снега солнечных лучей между кронами деревьев.

В комплексной обработке используются выборочные наземные таксационные данные, содержащие по выдельную информацию о породном составе, высотах, возрасте, запасах стволовой древесины.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения включает несколько последовательных этапов:

- сегментация объединенных многоканальных данных за летний сезон на спектрально-однородные участки земной поверхности;
- отбор сегментов с использованием таксационных данных для обучения классификатора и для оценки точности результатов классификации;
- классификация наземного покрова, анализ информативности спектральных признаков и оценка точности полученной карты;
- построение регрессионных зависимостей между значениями яркости в зимнем красном канале с лесотаксационными характеристиками (запасом стволовой древесины и высотой) на отобранных эталонных сегментах;

- построение карты запасов стволовой древесины, оценка точности определения запасов;
- построение карты средних высот насаждений, оценка точности определения высот;
- расчет среднего возраста насаждений по таблицам хода роста, определение групп возраста для каждой породы;
- расчёт запасов древесины в фитомассу по конверсионным коэффициентам.

В результате: создание карт средних возрастов, высот, запасов древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) и фитомассы ($\text{т}/\text{га}$) лесных насаждений.

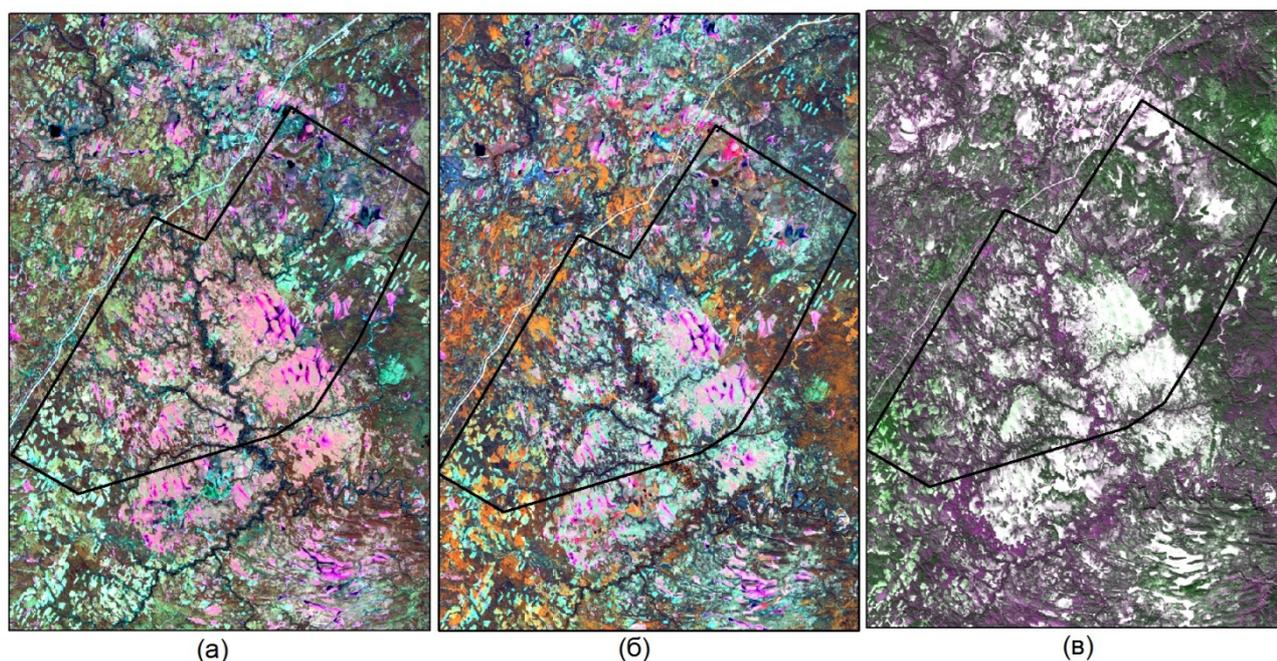


Рисунок 1. Весеннее (а), летнее (б), зимнее (в) спутниковые изображения Landsat-8 на исследуемой территории

Процедура управляемой классификации требует подготовки набора эталонов. В данном случае в качестве эталонов рассматриваются спектрально однородные сегменты. По спутниковым данным автоматически методом сегментации Full Lambda Schedule (FLS) (Redding et al., 1999) выделяются спектрально-однородные участки земной поверхности для оценки в них категории земель, преобладающей породы, возраста и запаса древостоя. Из таксационных данных составляется выборка выделов по преобладающим породам - не менее 7 единиц в составе первого яруса насаждения. Пересечение сегментов и таксационных выделов позволяет сформировать эталонные участки площадью более 1 гектара с преобладанием одной породы. Дополнительно проводится визуальная экспертная оценка эталонов для устранения случайных артефактов или грубых ошибок с использованием информации о типичных условиях произрастания тех или иных древесных пород в

исследуемой местности, а также возможных антропогенных нарушениях. Эталонная выборка лесных пород дополняется сегментами нелесных классов: гари, вырубки, другие, не покрытые лесом земли, болота, водоемы.

Поставленная задача имеет следующие этапы решения: (1) классификация наземного покрова с использованием всех спектральных признаков без исключения; (2) анализ информативности спектральных признаков и поиск их оптимального количества для классификации; (3) оценка точности полученных результатов с использованием независимой контрольной выборки (матрица ошибок).

Классификация и анализ информативности спектральных отражательных характеристик для задачи классификации преобладающих лесных пород выполняется с использованием статистического метода Random Forest (Breiman, 2001). Метод базируется на построении большого числа деревьев решений из исходной обучающей выборки. В этот алгоритм встроен подбор оптимального числа признаков, при котором дерево разделяет классы наиболее чётко, стремясь к тому, чтобы каждый лист дерева содержал наблюдения только одного класса. Получившиеся варианты классификации с разным числом признаков сравниваются по коэффициенту карра (Тюрин, Макаров, 1998). Чем выше его значение, тем больше согласованность разделения. В целях внутренней проверки весь алгоритм Random Forest выполняется несколько раз, в нашем случае – пять. Окончательный вариант классификации строится с помощью простого голосования классификаторов, определяемых отдельными деревьями (Чистяков, 2013).

Метод Random Forest позволяет оценивать информативность признаков с помощью предложенной Брейманом «меры важности» признака для классификации (Breiman, 2001). Для каждого признака строится случайный лес и оценивается вероятность ошибочной классификации *OOB* (*Out-Of-Bag*). Затем в *OOB* выборках производится случайная перестановка значений признака и проводится оценка вероятности ошибочной классификации по модифицированным *OOB* выборкам. Информативность признака оценивается методом усреднения по всем деревьям разности значений вероятности ошибок до и после перемешивания этих значений. При этом значения ошибок нормализуются на стандартное отклонение (Чистяков, 2013). Этот параметр условно называют средним уменьшением точности («mean decrease accuracy», MDA). Чем больше пикселей начинает покидать определённый вначале класс и перемешиваться с другими, тем к большему значению MDA приведёт случайное перемешивание выборки, а значит признак, значения которого перемешаны, более информативен (Guyon, Elisseeff, 2003).

При использовании Random Forest возможно проведение оценки точности классификации путём её сравнения с совокупностью предварительно отобранных случайным

образом из исходной выборки контрольных пикселей. Исходная выборка делится на две равные части: первая используется при обучении модели, вторая - при контроле точности классификации. Результатом данного анализа является матрица перепутывания классов, показывающая интегральную точность классификации.

Для анализа информативности признаков классификация проводится несколько раз с последовательным исключением поодиночке спектральных признаков с наименьшим значением MDA. Каждый раз строится матрица перепутывания и оценивается количество правильно распознанных пикселей и ошибка классификации первого и второго рода. На основе полученных ошибок строится график зависимости точности классификации от количества использованных признаков. Он позволяет определить по максимальному значению правильно распознанных пикселей оптимальное количество информативных признаков для распознавания пород тестового региона.

В результате классификации формируется карта наземного покрова исследуемой территории.

На следующем этапе для оценки запаса древесины и среднего возраста лесных насаждений проводится построение регрессионных зависимостей между значениями яркости в зимнем красном канале с лесотаксационными характеристиками (запасом стволовой древесины и высотой) на отобранных эталонных сегментах (Сочилова, Ершов, 2012). Процесс восстановления запасов и высот начинается с формирования опорной и контрольной выборок эталонов - участков лесонасаждений с преобладанием конкретной породы и с различным запасом стволовой древесины. Как правило, используется та же выборка, что и для классификации типов наземного покрова, разделённая на опорную и контрольную в соотношении 50 на 50 процентов. В случае, когда данных получается слишком мало, путём визуального анализа отбираются дополнительные эталоны той или иной породы. Затем для опорной выборки из сцены Landsat-8 извлекаются средние значения яркости для эталонных участков. Из полученного массива данных восстанавливаются уравнения связи между спектрально-отражательными яркостями каждой породы и таксационными характеристиками стволовой древесины внутри однородных участков леса. При оценке запаса древесины темнохвойных пород могут возникать трудности по причине малого количества чистых эталонных древостоев молодняков с низкими запасами. Решением этой проблемы может быть выделение дополнительных опорных участков лиственных древостоев с темнохвойными породами во втором ярусе.

Возраст насаждений определяется по высоте с использованием региональных таблиц хода роста и продуктивности насаждений. Были проанализированы региональные таблицы хода роста и продуктивности модальных насаждений (Швиденко и др., 2008; Нагимов, 2011;

Секерин, 2015; Онучин, 2017). Табличные данные и уравнения связи сопоставляются с фактическими данными о высоте и возрасте древостоев изучаемой области, и выбираются уравнения наиболее близкие к фактическим, по которым и рассчитывается возраст насаждений. Определенный таким образом возраст позволяет перейти к группам возраста лесных насаждений. Отдельно для пород по каждой возрастной группе вычисляются значения фитомассы, используя запас стволовой древесины и конверсионные коэффициенты (Замолодчиков и др., 2003). Формируются тематические растровые карты запасов стволовой древесины и фитомассы, высот и возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Классификация наземного покрова. На основе анализа материалов лесной таксации было выделено четыре преобладающие лесных породы, образующие насаждения достаточной чистоты и площади: сосна обыкновенная, ель, сосна сибирская (кедр) и берёза. Насаждений из клёна, липы и осины с преобладанием этих пород в 7 и более единиц представлено не было, поэтому сформировать выборку эталонных участков для них не удалось. На этапе подготовки эталонной выборки была проведена сегментация летнего изображения (2-5 каналы) сцены Landsat-8 на внутренне однородные по спектральным характеристикам сегменты. Пересечение сегментов и отобранных таксационных выделов позволило сформировать эталонные участки для обучения классификатора и контроля результатов. Эталонная выборка лесных пород была дополнена сегментами для нелесных классов: гари, вырубки, не покрытые лесом земли, болота и водоемы. В итоге эталонная выборка для обучения и контроля точности классификации составила: 1811 сегментов для четырёх классов лесных пород и 252 сегмента для пяти нелесных классов.

На первом этапе выполняется классификация территории на 9 типов наземного покрова, четыре из которых покрыты лесными классами с преобладающими породами: сосна, кедр, ель, береза. Для классификации используется 12 спектральных признаков: отражательная способность в синем (#2), зелёном (#3), красном (#4) и ближнем инфракрасном (#5) каналах системы OLI Landsat-8 за зимний, весенний и летний периоды. На основе эталонной выборки с использованием всех 12 признаков была проведена классификация наземного покрова алгоритмом Random Forest (рис. 2).

Интегральная точность классификации лесных пород составила 86.3%, ошибка первого рода (недооценка) – 15.1% и второго (переоценка) – 12.2% (табл. 1).

Наибольшая недооценка или пропуск контрольных пикселей приходится на ель (41%, главным образом за счёт перепутывания с насаждениями кедра), самая значительная

переоценка или ложная классификация наблюдается для неё же (35%). Для кедра эти значения составляют 34 и 28% соответственно, для сосны – 30 и 18%, для берёзы – 8 и 7%.

С помощью меры важности Бреймана была определена информативность каждого признака по среднему уменьшению точности (MDA) до и после случайного перемешивания значений каждого признака в модифицированной выборке, что позволяет ранжировать признаки по их важности. На рисунке 3 видно, что наибольшее значение MDA при перемешивании выборок наблюдается для отражательной способности в ближнем ИК-канале весеннего снимка. За ним идут зелёный и красный каналы летнего снимка. Наименьшую информативность демонстрируют зелёный канал зимой и весной. На основе этих данных выполнялась оценка информативности признаков методом последовательного исключения их из классификации и сравнения результатов с контрольной выборкой. Вначале для классификации были использованы все 12 признаков. Перекрестная проверка результатов классификации по контрольной выборке оказалась равной 0.712 (рис. 4). Далее из анализа был исключен зимний зелёный канал, что уменьшило значение точности по перекрестной проверке до 0.614. Затем последовательное исключение зелёного и синего каналов (весна), а также синего канала (зима) не изменило динамику изменения точности классификации, снизив её точность до 0.56 с восемью признаками. Таким образом, для классификации наземного покрова исследуемой территории информативными являются все двенадцать спектральных признаков.

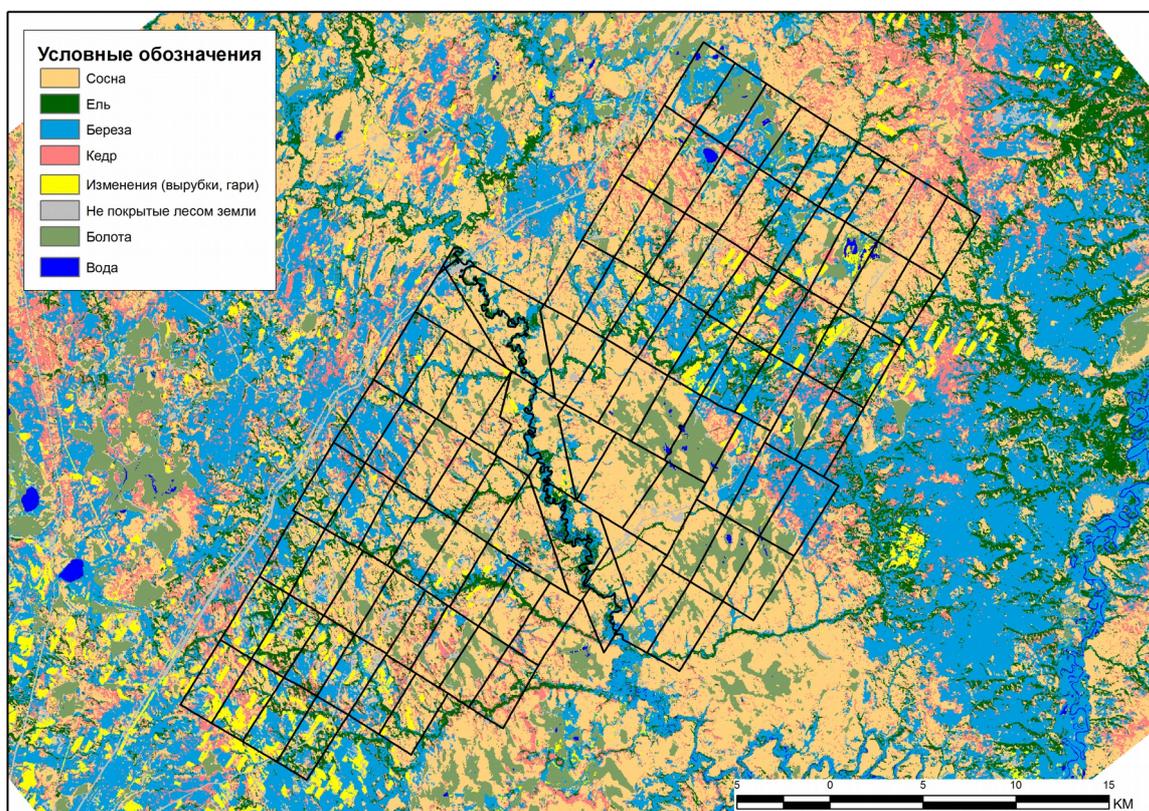


Рисунок 2. Карта классов наземного покрова исследуемого участка

Таблица 1. Матрица ошибок распознавания классов наземного покрова

	Сосна	Ель	Кедр	Берёза	Болота	Вода	Выруб-ки	Нелесные земли	Гари	Всего пикселей	Число ложно классифицированных пикселей	Вер-ть ложной классификации	Сред-нее
Сосна	744	69	66	8	5	0	9	1	1	903	159	0.176	
Ель	101	340	57	26	2	0	0	0	0	526	186	0.354	
Кедр	96	43	367	2	0	0	0	0	0	508	141	0.278	
Берёза	8	21	1	501	2	2	3	0	0	538	37	0.069	
Болота	5	3	0	0	522	1	1	0	0	532	10	0.019	
Вода	0	1	0	1	2	498	0	0	0	502	4	0.008	
Выруб-ки	19	2	1	4	0	0	464	5	23	518	54	0.104	
Нелесные земли	0	0	0	0	0	0	1	305	2	308	3	0.010	
Гари	0	0	0	0	0	0	38	2	467	507	40	0.079	
Всего пикселей	973	479	492	542	533	501	516	313	493	4842			
Число пропущенных пикселей	229	139	125	41	11	3	52	8	26		634		
Вер-ть пропуска класса	0.308	0.409	0.341	0.082	0.021	0.006	0.112	0.026	0.06				0.151
Среднее												0.122	

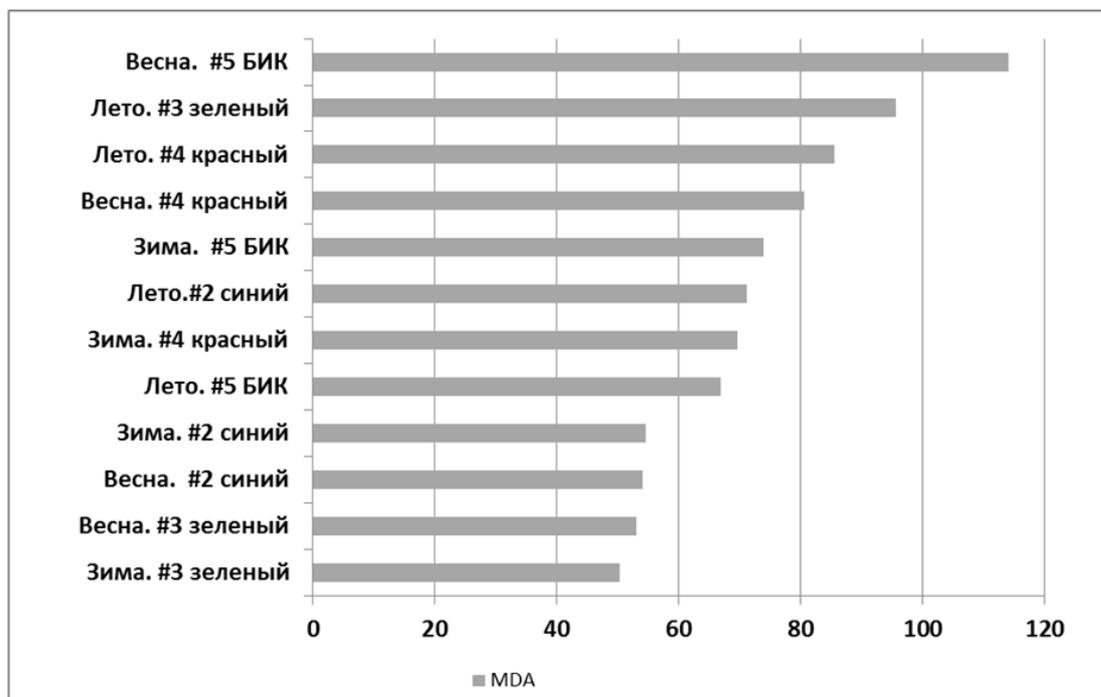


Рисунок 3. Оценка информативности признаков для классификации наземного покрова

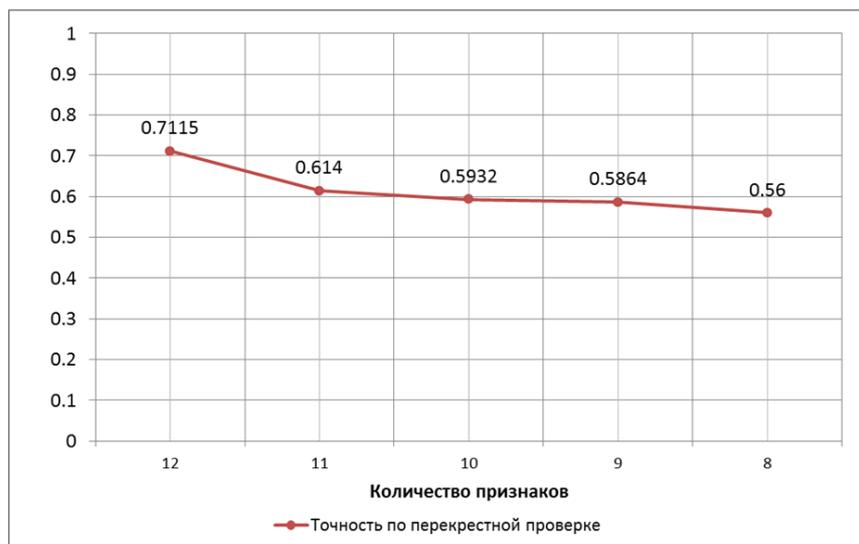


Рисунок 4. График изменения точности распознавания классов в зависимости от количества использованных признаков

Определение запасов стволовой древесины и фитомассы. Тестовые площадки – сегменты в соответствии с таксационной базой данных для хвойных и лиственных насаждений, выбирались таким образом, чтобы отразить наибольший диапазон значений запасов древесины. Всего в выборке было 350 участков сосновых насаждений, 112 участков берёзовых насаждений и 77 участков насаждений темнохвойных пород. К последним относятся ель и кедр. Площади участков составляют от 1.8 до 9.5 га. При оценке запаса древесины темнохвойных пород возникают трудности по набору эталонов для молодых насаждений с низкими запасами. Для решения этой проблемы были выделены дополнительные опорные участки берёзовых древостоев с темнохвойными породами во втором ярусе, в которых количество единиц темнохвойных насаждений в составе второго яруса должно быть 7 и более. На изучаемой территории выделение 28 дополнительных участков такого рода позволило поднять уровень достоверности восстановления запасов темнохвойных пород с 0.56 до 0.63. Для опорной выборки из зимней сцены Landsat-8 извлекаются значения спектрально-отражательной яркости по пикселям, после чего вычисляется среднее значение для каждого полигона. Построенные регрессионные зависимости между значениями яркости в зимнем красном канале с лесотаксационными характеристиками (запас и высота) имеют вид экспоненциальных кривых (рис. 5). Уровень взаимосвязи по запасам оказался равен 0.80 для сосны, 0.56 для темнохвойных пород и 0.73 для берёзы; по высотам - 0.75 для сосны, 0.64 для темнохвойных пород и 0.61 для берёзы. Контрольная выборка использовалась для оценки качества полученного результата. Ошибка

определения запаса для берёзы составила 39.5% для малых запасов (до 50 м³/га включительно) и 15.4% для запасов, превышающих 250 м³/га, для сосны составила 50.4% (до 50 м³/га включительно) и 15.5% (выше 350 м³/га), для темнохвойных пород соответственно 22.2% (до 150 м³/га) и 2.7% (выше 300 м³/га) (рис. 6).

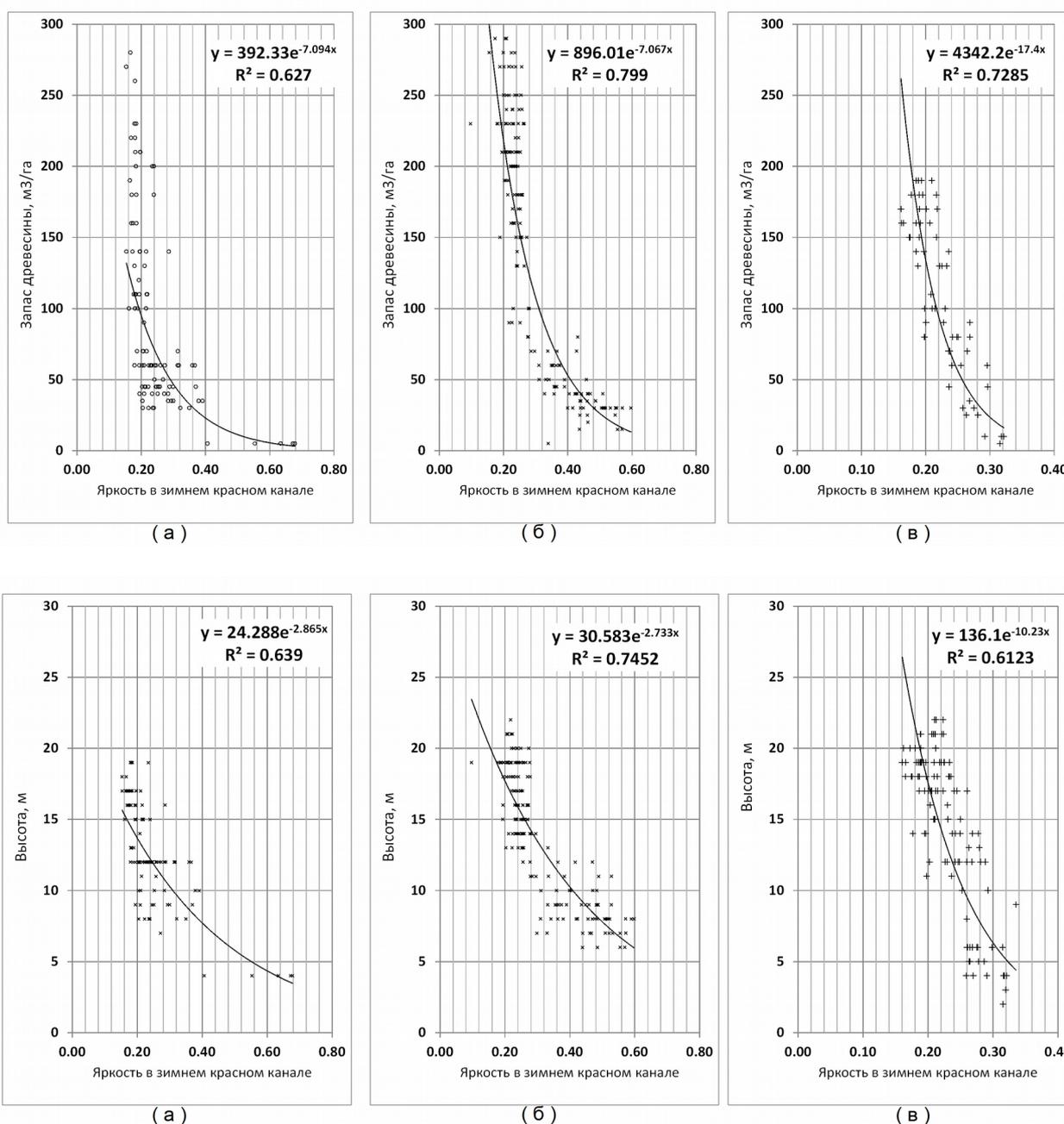


Рисунок 5. Взаимосвязь яркостей в зимнем красном канале и запасами стволовой древесины (м³/га) – верхний ряд; яркостей в зимнем красном канале и высотами (м) - нижний ряд; а – темнохвойные породы, б - сосна, в – береза

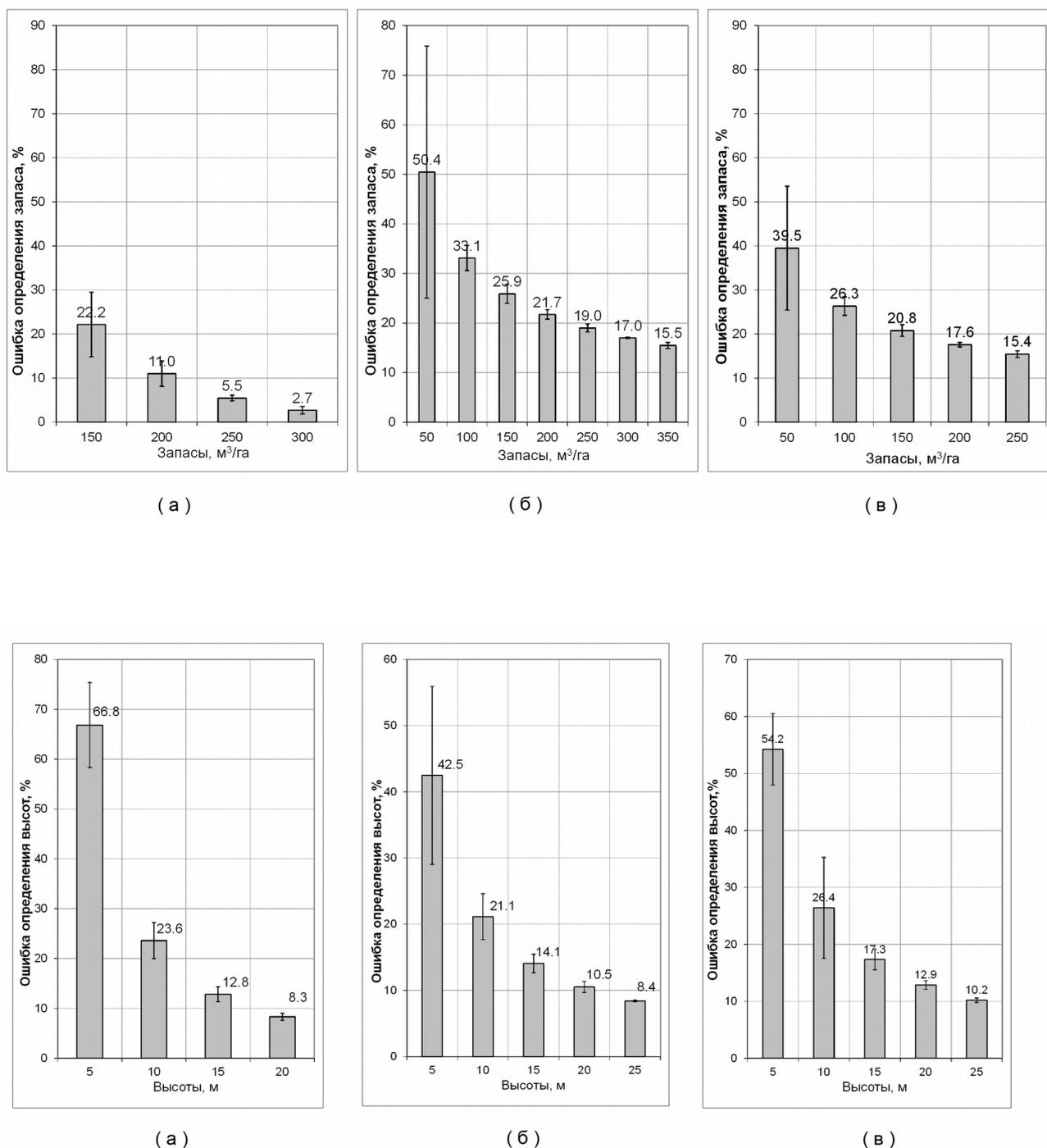


Рисунок 6. Ошибка определения запасов (верхний ряд) и высот (нижний ряд) по породам, проценты; а – темнохвойные породы, б - сосна, в – берёза

По коэффициентам уравнений регрессии значения спектральной яркости были пересчитаны в запасы стволовой древесины и высоты сосны, темнохвойных пород и берёзы в соответствии с результатами классификации. В итоге получена карта средних запасов древостоя в м³/га в каждом пикселе (рис. 7) и высоты насаждений (рис. 8).

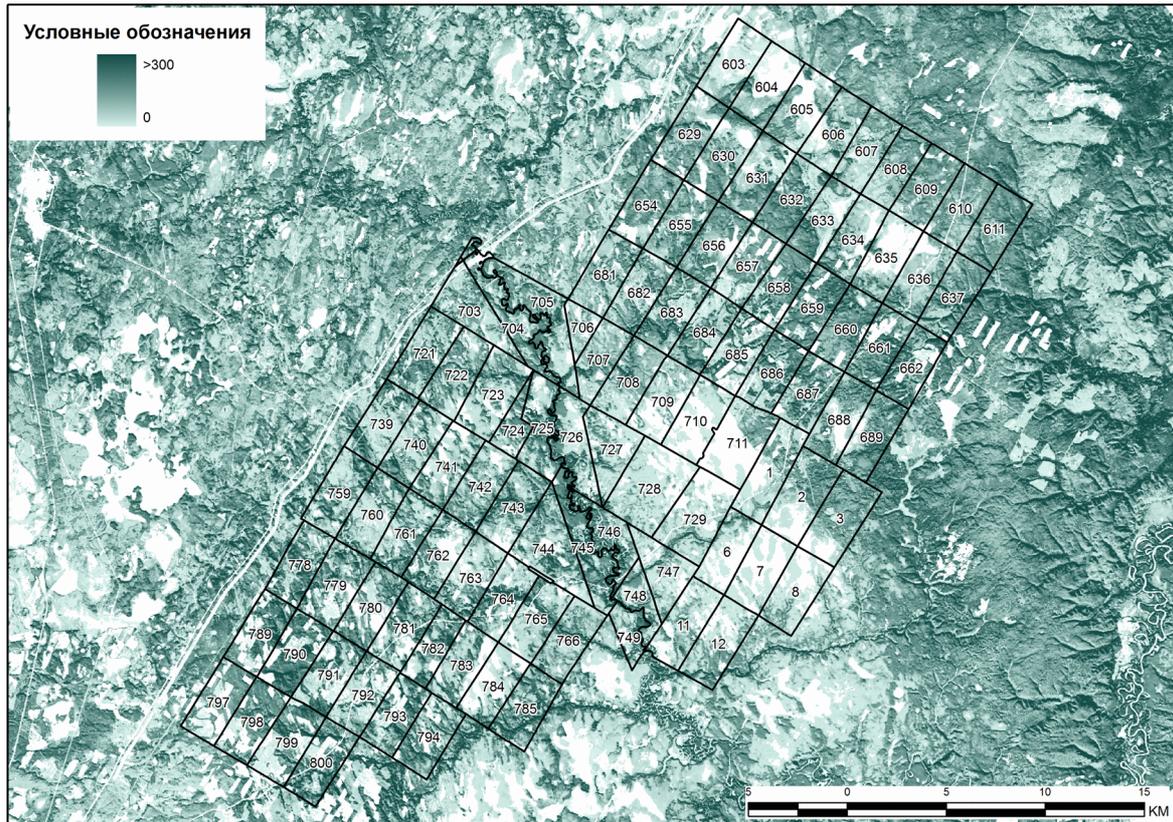


Рисунок 7. Карта запасов стволовой древесины, м³/га

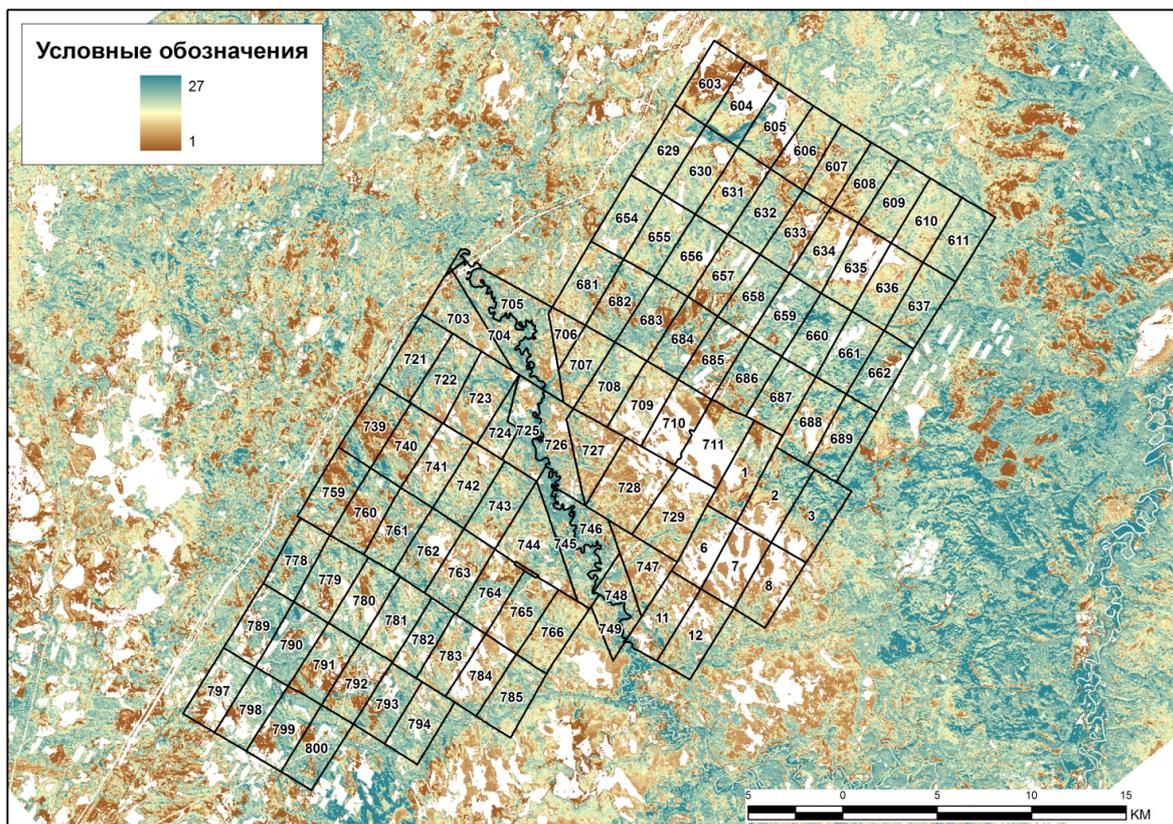


Рисунок 8. Карта высот насаждений, м

Определение запаса фитомассы предваряется определением возраста насаждений. Фитомасса рассчитывается по запасам стволовой древесины и конверсионным коэффициентам, определенным для каждой древесной породы, широтной зоны и группы возраста насаждений (Замолотчиков и др., 2003). Группы возраста для разных пород неодинаковы и принимаются по лесохозяйственному регламенту лесничества, территория которого изучается (табл. 2). Возраст определяется по кривым хода роста. Наиболее близко фактические данные соответствовали зависимостям, приведённым в работе А.З. Швиденко и др. (2008): для сосны V бонитета в северной тайге Западной Сибири, берёзы IV бонитета в средней тайге Сибири и кедра сибирского V бонитета в тайге Северного и Среднего Урала в гидроморфных условиях. По этим трём уравнениям (рис. 9) вычисляется возраст насаждений соответствующих пород для каждого пиксела изображения, содержащего данные о высотах, и строится карта возрастов насаждений исследуемой территории, затем определяются группы возрастов (рис. 10). В пределах каждой группы возраста насаждений выполняется перерасчёт запасов древесины в фитомассу по конверсионным коэффициентам и строится карта общих запасов фитомассы (рис. 11).

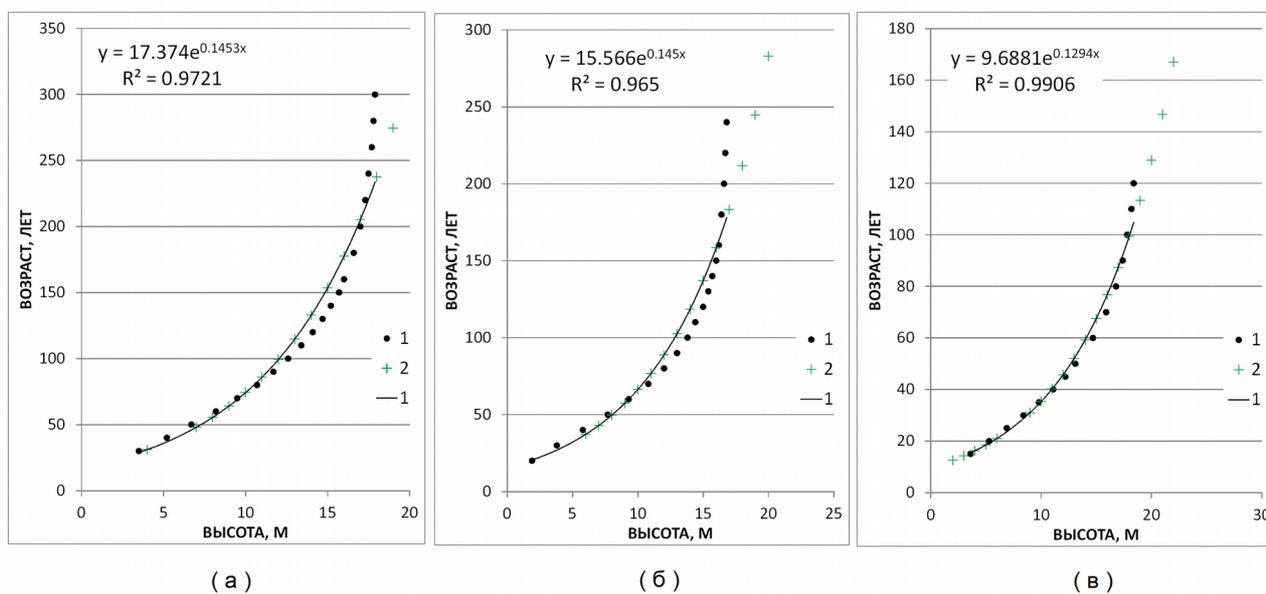


Рисунок 9. Взаимосвязь возраста и высоты для темнохвойных пород (а), сосны (б), березы (в). Цифрами обозначены: 1 – значения по таблицам хода роста и продуктивности насаждений Швиденко А.З., 2- восстановленные значения возрастов

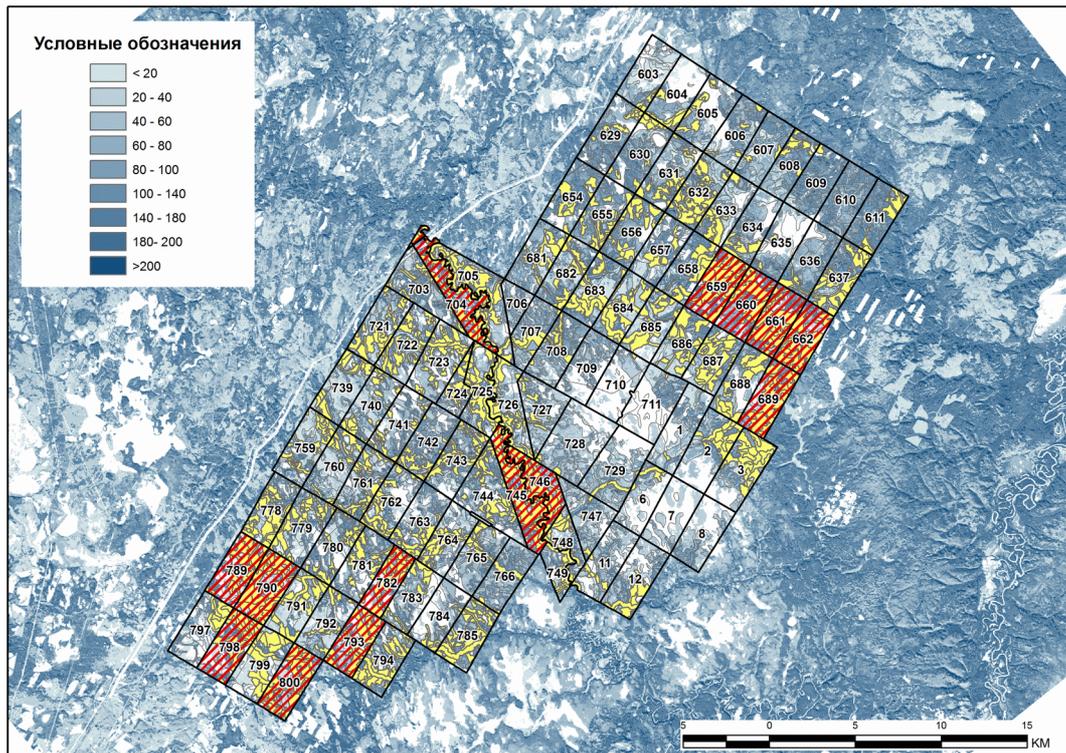


Рисунок 10. Карта возрастов насаждений, лет

На карте показаны желтым цветом выделы, а красной штриховкой кварталы, в которых более 50% площади имеют насаждения возраста рубки

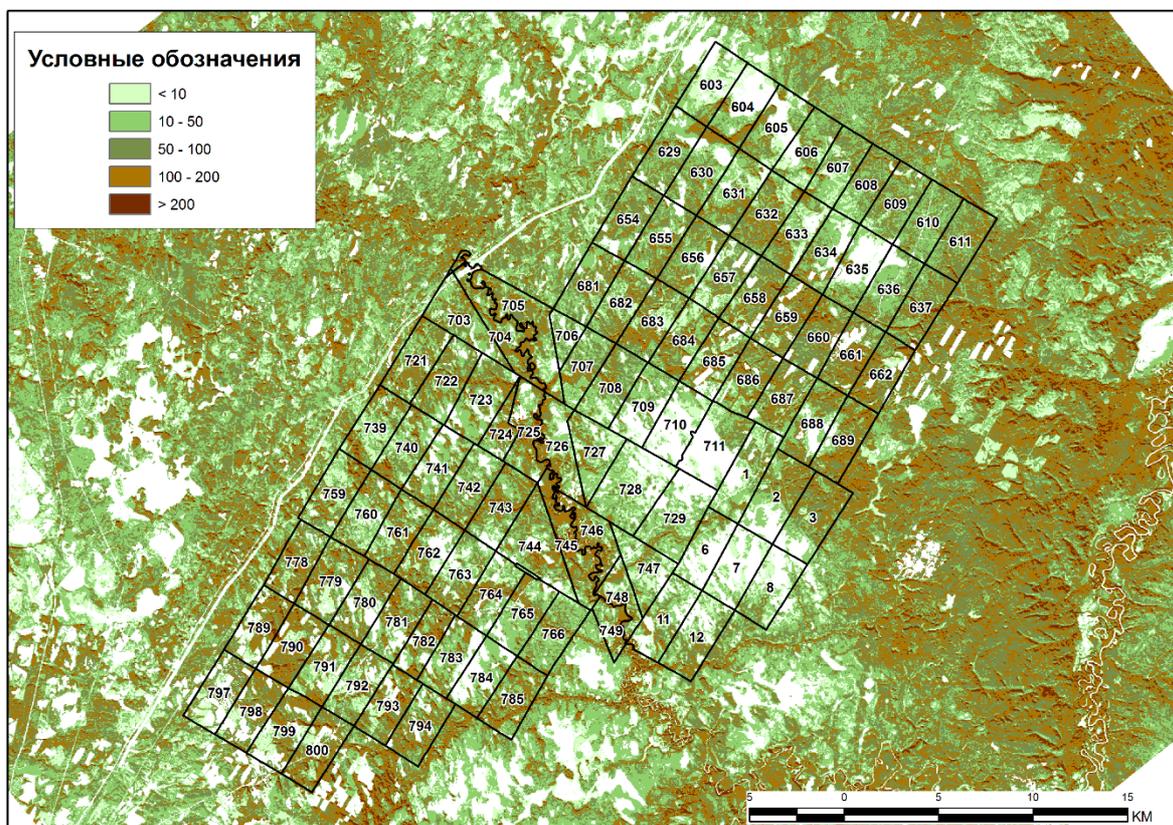


Рисунок 11. Карта общих запасов фитомассы, т/га

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа продемонстрировала возможность получения результатов оценки запасов фитомассы полого древостоя, определения высот и возрастов насаждений на основе классификации спутниковых разносезонных изображений высокого пространственного разрешения Landsat-8 и выборочным данным лесной таксации. В результате выполненных работ построены тематические карты средних возрастов, высот, запасов древостоя в м³/га и фитомассы в т/га. На основе карт проведены поквартальные оценки площадей и запасов основных лесообразующих пород тестовой территории, включая лесные участки, соответствующие возрасту рубки. Предлагаемые оценки могут использоваться в качестве актуальной информации для лесохозяйственных предприятий, а также для получения запасов лесных горючих материалов верхнего полого исследуемой территории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка методики исследований проводилась в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН по направлению «Развитие методических подходов к дистанционному мониторингу ресурсного потенциала и экологического состояния лесных экосистем» (АААА-А18-118021990060-1) и программе Президиума РАН «Разработка методических подходов к оценке экосистемных функций и услуг лесов» (№0110-2018-005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас лесов СССР. Москва: ГУГК, 1973. 222 с.
- Белова Е.И., Еришов Д.В. Метод предварительной обработки сцен Landsat-5/7 с изображением снежного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 9-14.
- Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. Москва. Наука. 1984. 320 с.
- Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. Учебник для студентов геогр. фак. ун-тов. Москва: Мысль, 1978. 512 с.
- Географические условия. ФГБУ "Государственный заповедник "Малая Сосьва" им. В.В. Раевского", 2018. URL: m-sosva.ru/?page_id=154
- Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157-168.
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. Сибирский государственный технологический университет, Вып. 1 (32). 2003. С. 119-127.
- Козлов Д. Н., Пузаченко М. Ю., Федяева М. В., Пузаченко Ю. Г. Картографирование запасов древостоя ели в биогеоценозах южной тайги (южная часть Валдайской возвышенности) на основе дистанционной информации Landsat-7 и цифровой модели рельефа. Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и

лесном хозяйстве. Доклады IV Международной конференции. Москва, 17- 19 апреля 2007 г. Издательство Московского государственного университета леса. Москва. 2007. С. 197-201.

Нагимов В.З. Рост и надземная фитомасса древостоев сосняка лишайникового в подзоне северной тайги Тюменской области. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. Екатеринбург, Уральский государственный лесотехнический университет, 2011. 23 с.

Онучин И.Е. Лесоводственно-таксационная оценка кедровых насаждений на территории Ханты-Мансийского автономного округа - Югры. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. Екатеринбург, Уральский государственный лесотехнический университет, 2017. 23 с.

Секерин Е.М. Пути повышения лесообразовательной роли сосны сибирской в подзоне южной тайги Урала. Автореферат диссертации на соискание научной степени кандидата сельскохозяйственных наук. Екатеринбург, Уральский государственный лесотехнический университет. 2015. 22 с.

Лесохозяйственный регламент Советского лесничества. Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. URL:http://ugrales.ru/files/7-Deyat/leshoz/lhr/16032018/Sovetskoe_29_03_2018__18-np.pdf

Сочилова Е.Н., Еришов Д.В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277-282.

Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере / Под ред. Фигурнова В.Э. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

Чистяков С.П. Случайные леса: Обзор // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 117-136.

Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Федеральное агентство лесного хозяйства. Международный институт прикладного системного анализа. 2008.

Arroyo L.A, Pascual C., Manzanera J.A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing // Forest Ecology and Management. 2008. No. 256. P. 1239-1252.

Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5-32.

Chirici G., Barbati A., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., Maselli F., Bertini R. Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems // Remote sensing of Environment. 2008 Vol. 112. Issue 5. P. 2686-2700.

Fazakas Z., Nilsson M., Olsson H. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data //Agricultural and Forest Meteorology, 1999 No. 98 (1). P. 417-425.

Gharun M., Possell M., Jenkins M.E., Poon L.F., Bell T.L., Adams M.A. Improving forest sampling strategies for assessment of fuel reduction burning // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 392. P. 78-89.

Guyon I., Elisseeff A. An Introduction to Variable and Feature Selection // Journal of Machine Learning Research. 2003. Vol. 3 (1). P. 1157-1182.

Hall R.J., Davidson D.P., Peddle D.R. Ground and remote estimation of leaf area index in Rocky Mountain forest stands, Kananaskis, Alberta // The international journal of remote sensing. 2003 No. 29. P. 411-427.

Hall R.J., Skakun R.S., Arsenault E.J., Case B.S. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume // Forest Ecology and Management. 2006. No. 225. P. 378-390.

Halme M., Tomppo E. Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates by reducing plot location error — a multicriteria approach // Remote sensing of Environment. 2001. No. 78. P. 321-327.

Hame T., Salli A., Andersson K., Lohi A. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. No. 15. P. 3211-3243.

Ji L., Wylie B.K., Nossov D.R., Peterson B., Waldrop M.P., McFarland J.W., Rover J., Hollingsworth T.N. Estimating aboveground biomass in interior Alaska with Landsat data and field measurements // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. Vol. 18. P. 451-461.

Kuusela K., Poso S. Satellite pictures in the estimation of the growing stock over extensive area // *The Photogrammetric Journal of Finland*. 1970. Vol. 4. No. 1 P. 3-9.

Markham B.L., Barker J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures // *Earth Observation Satellite Co., Lanham, MD Landsat Technical Notes*. Vol. 1. No. 1. 1986. P. 3-8.

Mura M., Bottalico F., Giannetti F., Bertani R., Giannini R., Mancini M., Orlandini S., Travaglinia D., Chirici G. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems // *The International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. No 66. P. 126-134.

Poso S., Paananen R., Simila M. Forest inventory by compartments using satellite imagery // *Silva Fennica*. 1987. Vol. 2. No. 1. P. 69-94.

Redding N.J., Crisp D. J., Tang D., Newsam G.N. An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery // *Proc. Conf. «Digital Image Computing: Techniques & Applications» (DICTA-99)*. Australia: Perth. 1999. P. 35-41.

Tokola T. The Influence of field sample data location on growing stock volume estimation in Landsat TM-based forest inventory in Eastern Finland // *Remote sensing of environment*. 2000. Vol. 74. Issue 3. P. 422-431.

Tokola T., Heikkilä J. Improving satellite image based forest inventory by using a priori site quality information // *Silva Fennica*. 1997. No 31 (1). P. 67-78.

Zhang J., Huang S., Hogg E.H., Lieffers V. Qin Y., He F. Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data // *Biogeosciences*. 2014. No. 11. P. 2793-2808.

Zheng S., Cao C., Dang Y., Xiang H., Zhao J., Zhang Y., Wang X., Guo H. Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images // *The international journal of remote sensing*. 2014. No. 35. P. 29-43.

REFERENCES

Atlas lesov SSSR (The Atlas of Forests in USSR), Moscow: GUGK, 1973, 222 p.

Belova E.I., Ershov D.V., Metod predvaritel'noi obrabotki stsen Landsat-5/7 s izobrazheniem snezhnogo pokrova (The method for processing of Landsat-5/7 scenes with snow cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 9-14.

Vinogradov B.V., *Aerokosmicheskii monitoring ekosistem* (Ecosystem monitoring from air and space), Moscow: Nauka, 1984. 320 p.

Gvozdetskiy N.A., Mikhailov N.I., *Fizicheskaya geografiya SSSR. Aziatskaya chast'* (Physical geography of USSR. Asian part), Moscow: Mysl', 1978, 512 p.

URL://m-sosva.ru/? page_id=154

Zharko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A., Issledovanie vozmozhnostei otsenki zapasov drevesiny v lesakh Primorskogo kraja po dannym sputnikovoi sistemy Proba-V (Possibilities of timber stocks inventory using Proba-V satellite data in Primorsky Krai), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157-168.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V., Koeffitsienty konversii zapasov nasazhdenii v fitomassu dlya osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii (Coefficients for

conversion of timber stock to phytomass for main tree species in Russia), *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, 2003, Issue 1 (32), pp. 119-127.

Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu., Fedyaeva M.V., Puzachenko Yu.G., Kartografirovanie zapasov drevostoya eli v biogeotsenozakh yuzhnoi taigi (yuzhnaya chast' Valdaiskoi vozvyshennosti) na osnove distantsionnoi informatsii Landsat-7 i tsifrovoy modeli rel'efa. (Spruce timber stocks mapping using Landsat-7 and DEM data in the South part of Valdai upland) *Aerospace methods and gis-technologies in forestry and forest management: Reports of the IV International Conference*, Moscow, 17- 19 April 2007, Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa, 2007, pp. 197-201.

Nagimov V.Z., *Rost i nadzemnaya fitomassa drevostoev sosnyaka lishainikovo v podzone severnoi taigi Tyumenskoi oblasti. Avtoreferat diss. cand. s.-kh. n.* (The growth and phytomass of lichen pine forest in northern taiga forest in Tumen region. Extended abstract of candidate's agriculture sci. thesis), Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet, 2011, 23 p.

Onuchin I.E., *Lesovodstvenno-taksatsionnaya otsenka kedrovyykh nasazhdenii na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry. Avtoreferat diss. cand. s.-kh. n.* (Forestry examination of Siberian stone pine forests in the Khanty-Mansijsk Autonomous District -YGRA. Extended abstract of candidate's agriculture sci. thesis), Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet, 2017, 23 p.

Sekerin E.M., *Puti povysheniya lesoobrazovatel'noi roli sosny sibirskoi v podzone yuzhnoi taigi Urala. Avtoreferat diss. cand. s.-kh. n.* (Ways to raise forest-forming role of Siberian stone pine in the South Ural taiga forests. Extended abstract of candidate's agriculture sci. thesis) Ekaterinburg, Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet, 2015, 22 p.

URL:http://ugrales.ru/files/7-Deyat/leshoz/lhr/16032018/Sovetskoe_29_03_2018__18-np.pdf

Sochilova E.N., Ershov D.V., Analiz vozmozhnosti opredeleniya zapasov drevesnykh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM (Possibility analysis of stem volume of forests assessment using Landsat ETM data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 277-282.

Tyurin Yu.N., Makarov A.A., *Statisticheskii analiz dannykh na komp'yutere* (Statistical analysis of data with the computer), Moscow: INFRA-M, 1998, 528 p.

Chistiakov S.P., Sluchainye lesa: Obzor (Random Forests: An overview), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, No. 1, pp. 117-136.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Yu.I., *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaistva, Mezhdunarodnyi institut prikladnogo sistemnogo analiza, 2008, 886 p.

Arroyo L.A, Pascual C., Manzanera J. A., Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing, *Forest Ecology and Management*, 2008, No. 256, pp. 1239-1252.

Breiman L., Random forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, No.1, pp. 5-32.

Chirici G., Barbati A., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., Maselli F., Bertini R., Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems, *Remote sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, Issue 5, pp. 2686-2700.

Fazakas Z., Nilsson M., Olsson H., Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, No. 98 (1), pp. 417-425.

Gharun M., Possell M., Jenkins M.E., Poon L.F., Bell T.L., Adams M.A., Improving forest sampling strategies for assessment of fuel reduction burning, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 392, pp. 78-89.

Guyon I., Elisseff A., An Introduction to Variable and Feature Selection, *Journal of Machine Learning Research*, 2003, Vol. 3 (1), pp. 1157-1182.

Hall R.J., Davidson D.P., Peddle D.R., Ground and remote estimation of leaf area index in Rocky Mountain forest stands, Kananaskis, Alberta, *The international journal of remote sensing*, 2003, No. 29, pp. 411-427.

Hall R.J., Skakun R.S., Arsenault E.J., Case B.S., Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume, *Forest Ecology and Management*, 2006, No. 225, pp. 378-390.

Halme M., Tomppo E., Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates by reducing plot location error – a multicriteria approach, *Remote sensing of Environment*, 2001, No. 78, pp. 321-327.

Hame T., Salli A., Andersson K., Lohi A., A new methodology for the estimation of biomass of coniferdominated boreal forest using NOAA AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, No. 15, pp. 3211-3243.

Ji L., Wylie B.K., Nossov D.R., Peterson B., Waldrop M.P., McFarland J.W., Rover J., Hollingsworth T.N., Estimating aboveground biomass in interior Alaska with Landsat data and field measurements, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, Vol. 18, pp. 451-461.

Kuusela K. Poso S., Satellite pictures in the estimation of the growing stock over extensive area, *The Photogrammetric Journal of Finland*, 1970, Vol. 4, No. 1, pp. 3-9.

Markham B.L., Barker J.L., Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures, *Landsat Technical Notes*, Vol.1, No. 1, 1986, P. 3–8.

Mura M., Botalico F., Giannetti F., Bertani R., Giannini R., Mancini M., Orlandini S., Travaglinia D., Chirici G., Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems, *The International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, No 66, pp. 126-134.

Poso S., Paananen R., Simila M., Forest inventory by compartments using satellite imagery, *Silva Fennica*, 1987, Vol. 2, No. 1, pp. 69-94.

Redding N.J., Crisp D.J., Tang D., Newsam G.N., An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery, *Proc. Conf. «Digital Image Computing: Techniques & Applications» (DICTA-99)*, Perth, 1999, pp. 35-41.

Tokola T., The Influence of field sample data location on growing stock volume estimation in Landsat TM-based forest inventory in Eastern Finland, *Remote sensing of environment*, 2000, Vol. 74, Issue 3, pp. 422-431.

Tokola T., Heikkilä J., Improving satellite image based forest inventory by using a priori site quality information, *Silva Fennica*, 1997, No. 31 (1), pp. 67-78.

Zhang J., Huang S., Hogg E.H., Lieffers V. Qin Y., He F., Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data, *Biogeosciences*, 2014, No. 11, pp. 2793-2808.

Zheng S., Cao C., Dang Y., Xiang H., Zhao J., Zhang Y., Wang X., Guo H., Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images, *The international journal of remote sensing*, 2014, No. 35, pp. 29-43.

ASSESSMENT OF BIOMASS OF FOREST SPECIES USING SATELLITE IMAGES OF HIGH SPATIAL RESOLUTION (ON THE EXAMPLE OF THE FOREST OF KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG)

E.N. Sochilova¹, N.V. Surkov^{1,2}, D.V. Ershov¹, V.A. Khamedov³

¹*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS*

Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

³ *Yugra State University, Khanty-Mansiys, 628012, Russia*

E-mail: elena@ifl.rssi.ru

Received 30 October 2018

The paper describes assessment of spatial biomass of top wood layer based on combination of high-resolution Landsat-8 satellite images and selected ground forest inventory data measurements. Test area is one of forestry of Khanty-Mansiysk region. Segmentation of satellite images for spectral homogeneous land sites (segments) mapping is applied. Land category, dominated specie, age and wood stock volume for these sites are defined. Ground forest inventory data and segments used for selection of segments for dominated specie classification and validation of obtained map. The first, nine types of land cover are classified, four of them belong to forest cover with dominating of pine, spruce, cedar and birch. The reference sample is updated by segments of such non-forest classes as fires, cuts and other non-forested lands, swamps, water internal bodies. Twelve spectral metrics are used for classification: reflectance in blue, green, red and near-infrared bands of Landsat-8. There are following vegetation seasons: end of winter, beginning of spring and middle of summer. The most significant informative metrics are the reflectance in the NIR band of the spring image, also green and red bands of the summer image. Random Forest algorithm is applied for training classification. The total accuracy of land categories and dominated species classification is 86.3%. Cross-validation of the classification based on the control sample was 0.712. In the second stage, we used regression models to relate the reflectance in the red band of the winter image with the taxation characteristics of the wood stock and age of the forest species in the selected reference segments. The level of relationship between the reflectance and wood stock values were equal to 0.80 for pine, 0.56 for dark coniferous species and 0.73 for birch. Between the reflectance and the specie height is following 0.75 for pine, 0.61 for birch and 0.64 for dark coniferous species. A check with control data showed that the error in estimating the wood stock above 250 m³ / ha for birch is 15.4%, for pine - 19.0% and for dark coniferous species - 5.5%. We used regional growth tables and the mean heights reconstructed from the regression equations for calculation mean specie ages. Then the age groups (according regional felling age) for each species are determined and the wood stocks are converted into wood biomass by conversion coefficients. As a result, maps of mean ages, heights, wood stock in m³/ha and biomass in t/ha were created. Based on these maps quarter assessments of the areas and stocks of the main dominated forest species of our test area, including felling age forest stands, were carried out.

Key words: *stand biomass, wood stock volume, remote sensing data, Landsat-8, forest classification, Random Forest, forestry*

Рецензент: д.т.н., профессор Лебедев Ю.В.