

УДК 630*585

ПОГРЕШНОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛЕСОВ ПРИАНГАРЬЯ МЕТОДОМ КЛАССИФИКАЦИИ ПИКСЕЛЕЙ СПУТНИКОВОГО СНИМКА

С. К. Фарбер¹, Н. С. Кузьмик¹, Н. В. Брюханов²

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Филиал ФГБУ «Рослесинфорг» «Востсиблеспроект»
660062, Красноярск, ул. Н. К. Крупской, 42

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, natalia_5791@mail.ru, lespres@post.kts.ru

Поступила в редакцию 24.03.2015 г.

Работа выполнена с целью выявления погрешностей метода дешифрирования лесов, основанного на автоматизированной классификации пикселей изображения по спектральной яркости. Дешифрирование произведено по спутниковому снимку Landsat 5 (август 2005 г.). Результаты дешифрирования сравнивали с данными массовой таксации – описаниями лесотаксационных выделов и планом лесонасаждений, окрашенным по преобладающим древесным породам. Площадь лесного участка 80,8 тыс. га, лесотаксационных выделов на участке около 2700, из них 573 выборочных; задано 10 кластеров классификации изображения. Обнаружено, что на уровне генерализации лесотаксационного выдела наблюдаются недопустимые погрешности в наименованиях категорий земель, лесных формаций и преобладающих пород древостоя. Поэтому дешифрирование лесных земель методом классификации спектральных яркостей пикселей спутникового снимка применимо только для мелкомасштабного картографирования. Включение в процесс дешифрирования пространственного анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) позволяет повысить качество результатов. Страты местоположений формализованы посредством учета абсолютных высот местности, значений уклонов и экспозиций. Пространственный анализ выполнялся на основе данных Shuttle radar topography mission (SRTM). Полученные величины ошибок полноты древостоев, средних значений возраста и высот деревьев превышают нормативно установленные даже для наименее подробного III разряда лесоустройства. При этом снижения величин ошибок с переходом к отдельным стратам местоположений не наблюдается. Наименование лесных земель, варьирование таксационных показателей насаждений не зависят от изображения на спутниковых снимках, поэтому представляется сомнительной сама возможность достижения требуемой точности дешифрирования методами классификации и преобразования изображений, в том числе с помощью нормализованного вегетационного индекса. Таким образом, использование методов классификации спутниковых изображений для инвентаризации лесов в их современном виде рекомендовать нельзя.

Ключевые слова: спутниковые снимки, спектральная яркость, классификация пикселей изображения, страты местоположений, лесные земли, таксационные показатели.

DOI: 10.15372/SJFS20150406

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все чаще появляются публикации об успешном использовании данных дистанционного зондирования Земли для решения многочисленных научно-практических задач природопользования, мониторинга и даже прогноза состояния окружающей среды. Прогресс стал возможен благодаря появлению современных технических средств получения информа-

ции и программ для ее обработки. Выбираются, как правило, наиболее доступные информационные продукты. По мнению М. Ю. Пузаченко и др. (2008), для оценки состояния растительного покрова на региональном уровне подходят спутниковые снимки низкого (1 км) и среднего (250 м) разрешения системы Modis, а также мозаики сцен спутника Landsat 5. Для оценки состояния растительного покрова на локальном уровне предпочтение отдается снимкам более высокого

© Фарбер С. К., Кузьмик Н. С., Брюханов Н. В., 2016

разрешения. Перечень действующих спутниковых систем весьма обширен, и зачастую трудно какой-либо из них отдать предпочтение. Ориентируясь по критерию доступности, можно все же выделить снимки, получаемые со спутников серии Landsat в нескольких спектральных диапазонах. Последний спутник серии – Landsat 8 (Мирков, 2013). Снимки других спутниковых систем высокого и сверхвысокого разрешения также могут использоваться для оценки параметров окружающей среды.

Наличие у сенсоров космических спутников нескольких спектральных каналов съемки определяет возможность их комбинирования с получением изображения, на котором прописываются дешифровочные признаки объекта изучения. Например, группировка спутников RapidEye оборудована мультиспектральной камерой высокого разрешения JSS56 (Jena Spaceborne Scanner 56); съемка производится в пяти спектральных каналах (Маркс, 2011). На спутнике Landsat 8 используются два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Первый набор получает изображения в девяти диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК), второй – в двух диапазонах дальнего (теплого) инфракрасного излучения (Sharing Earth Observation Resources, 2014).

При дешифрировании объектов изучения предпочтение отдается мульти- и даже гиперспектральным снимкам (Электронный ресурс: <http://sovzond.ru/services/photogrammetry/the-generation-of-composite-images-/>). Наиболее распространены методы контролируемой и неконтролируемой классификации пикселей изображения. Неконтролируемая классификация заключается в разделении пикселей изображения на кластеры; контролируемая классификация предполагает отнесение пикселей изображения к определенному классу объектов местности (Методы..., 2011). При этом процесс дешифрирования становится автоматизированным или как минимум интерактивным. Для варианта неконтролируемой классификации задача оператора-дешифровщика сводится к присвоению кластерам определенных характеристик лесных объектов, для варианта контролируемой классификации – в отнесении каждого пикселя снимка к определенному классу объектов на местности.

Специалисты, исследующие возможности методов дешифрирования по мультиспектральным спутниковым снимкам, отдают предпочтение оптимистичному прогнозу их примени-

мости (Никитина, Никитин, 2011). Наш опыт, полученный в процессе дешифрирования лесных объектов методом классификации пикселей по спектральной яркости изображения снимков Landsat 5 в условиях горного рельефа Тывы и равнинно-плоскогогорного рельефа Красноярского Приангарья, показал, что в целом результаты следует признать неудовлетворительными (Брюханов и др., 2012; Мурзакматов и др., 2014; Мурзакматов, Фарбер, 2014). Перечислим типичные ошибки, которые зафиксированы в процессе дешифрирования:

- не различаются не покрытые лесом земли (населенные пункты, дороги, ЛЭП, вырубки, потоки бурлящей воды, сенокосы, пашни, луга и т. д.);

- темнохвойные насаждения в поймах и речных террасах могут определяться водами, а также лиственничными и сосново-лиственничными насаждениями с примесью ели и кедра;

- смешанные лиственничные и сосново-лиственничные насаждения по берегам рек могут определяться темнохвойными насаждениями;

- сосновые и лиственничные насаждения попадают в один кластер классификации изображения;

- отделения березняков от осинников, а также смешанных лиственных от хвойных насаждений не прослеживаются;

- крутые безлесные теневые склоны в высокогорье определяются как воды;

- не разделяются типы лесов и возрастные группы (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные);

- определение возраста и высот элементов леса может производиться только при наличии дополнительных источников информации или в экспертном порядке.

Выбор метода дешифрирования зависит от специфики задачи и требований к уровню точности и достоверности результатов. Можно согласиться, что обзорное тематическое картографирование лесов не требует жесткого обоснования точности и достоверности результатов. Так, для задачи составления карты лесов по категориям земель приемлемо использование снимков среднего и низкого разрешения. С. А. Барталев и др. (2013) карту лесов России с пространственным распределением преобладающих древесных пород по состоянию на 2012 г. получили на основе данных Modis (230 м). Более дробная классификация лесов с их подразделением на темно- и светлохвойные, лиственные смешанные и т. д. получена авторами на основе данных Landsat

(28 м). Однако для таксации эксплуатационных и резервных лесов даже по наименее подробному третьему разряду лесоустройства подразделения лесной территории только на категории земель или лесные формации явно недостаточно. Проблема точности таксационных описаний была и остается актуальной вне зависимости от метода таксации. Не снимается эта проблема и по отношению к методам дешифрирования лесов с использованием мультиспектральных космических снимков. Цель данной работы – выявление ошибок дешифрирования лесов, выполненного посредством проведения классификации пикселей космических снимков по их спектральной яркости.

РАЙОН, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследование проведено на арендованной территории лесозаготовительного предприятия, расположенной в Яркинском участковом лесничестве Хребтовского лесничества Красноярского края (рис. 1). Площадь тестового участка (далее ТУ) 80,8 тыс. га. По лесорастительному районированию И. А. Короткова (1994), территория Хребтовского лесничества относится к Приангарскому округу южно- и подтаежных светлохвойных лесов. Лесоинвентаризация Яркинского участкового лесничества проведена в 1996 г. по III разряду лесоустройства.

Стратификация местности по абсолютным высотам, уклонам и экспозициям произведена на основе материалов цифровой модели рельефа (ЦМР). Использованы данные SRTM, которые в Интернете распространяются в виде сеток с размером ячейки 3 угловые секунды (Электронный ресурс: <http://gis-lab.info/data/srtm-tif/>). Файл (SRTM3) представляет собой матрицу из 1201×1201 значений. Данные SRTM импортируются в различные программы построения карт и ГИС (Farr et al., 2000). Территория ТУ расположена в границах матриц SRTM 56-01 и SRTM 56-02.

Дешифрирование таксационных показателей лесов ТУ произведено по спутниковому снимку Landsat 5 (август 2005 г.). Результаты сравнивали с данными массовой таксации – описаниями лесотаксационных выделов и планом, окрашенным по преобладающим древесным породам лесонасаждений.

Пространственный анализ ЦМР (SRTM 56-01 и SRTM 56-02) выполнен в программной среде ГИС ArcMap с помощью инструментов Spatial Analyst. В пределах ТУ с учетом в целом

незначительных перепадов абсолютных высот выделены только два высотных пояса: до 300 м и более 300 м над ур. м. Дальнейшая формализация страт местоположений производилась по величинам крутизны и экспозиции склонов: плоские местоположения от 0° до 2°, склоны южной и северной экспозиции. В результате для каждого высотного пояса получены полигоны склонов и плоских местоположений (долины рек, ручьев, водораздельные пространства). Общее количество страт местоположений – 6, по 3 на каждый высотный пояс. В пределах страт местоположений наблюдается относительная однородность показателей рельефа, что определяет и однородность лесорастительных условий (рис. 2).

Обработка космического снимка проведена в программной среде ГИС ArcMap с помощью инструмента Composite Band из набора Data Management, Tools, Raster. Композитное изображение получено посредством слияния каналов 4–3–2. Считается, что для Landsat 5 такая комбинация каналов обладает наибольшей информативностью по отношению к задачам дифференциации растительного покрова (Quinn, 2001). Слияние каналов осуществлено по алгоритму ESRI (рис. 3).

Обобщая выводы других авторов, Е. А. Вершовский (2010) констатирует, что использование алгоритмов неконтролируемой классификации не дает качественного преимущества в сравнении с методами контролируемой классификации и экспертной оценки, а дешифрирование требует привлечения оператора на том или ином этапе обработки мультиспектральных данных. Справедливость равнозначности методов классификации для оценки растительного покрова находит подтверждение в работе И. А. Ембаева, А. В. Абросимова (2009), которые установили, что выделение типов охотничьих угодий по алгоритмам классификации с обучением и без обучения приводят к принципиально равнозначным результатам. С. В. Князева (2006) показала, что достоверность распознавания классов природных объектов для вариантов автоматизированного дешифрирования космических снимков различается незначительно (сравнивались алгоритмы максимального правдоподобия, минимальных расстояний и кластеризации).

Таким образом, при использовании как контролируемой, так и неконтролируемой классификации ошибки дешифрирования будут различаться незначительно. Для цели настоящей

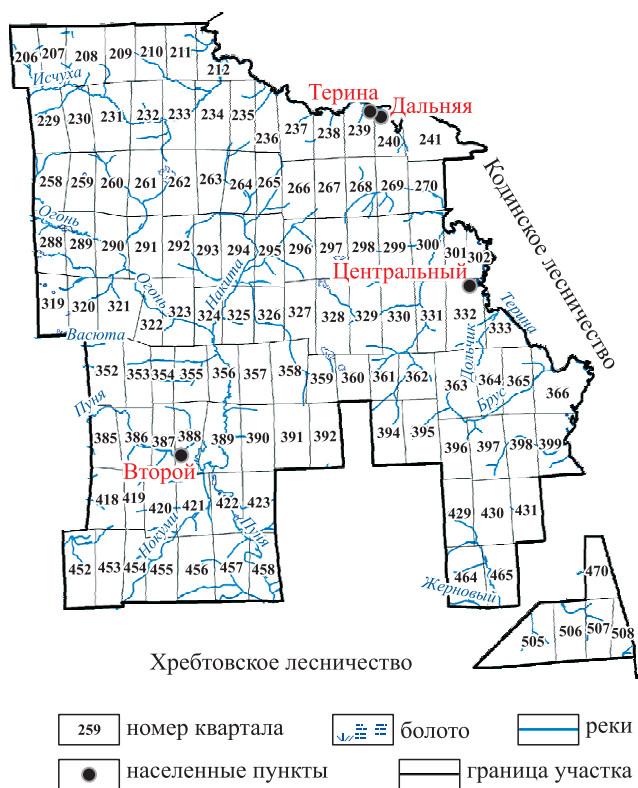
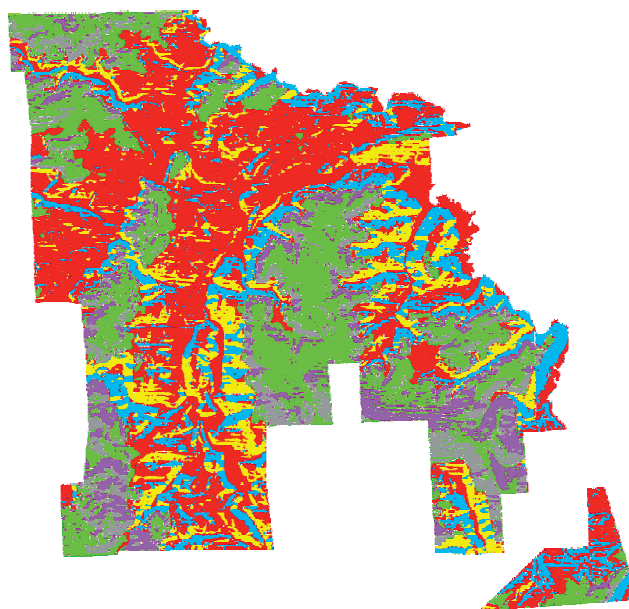


Рис. 1. Схема расположения и квартальная сеть ТУ.

работы важен только факт достижения равнозначной точности определения характеристик лесотаксационных выделов, а не диапазон возможностей методов классификации. И если нет существенных различий в ошибках результатов, то предпочтение следует отдать более простому варианту неконтролируемой классификации, которая в пределах ТУ была произведена инструментом Изокластер программной среды ArcMap.

С. К. Фарбер и Н. В. Брюханов (2014) обозначили причины неоднородной структуры лесотаксационных выделов: площадь меньше нормативно установленной, естественное варьирование таксационных показателей, неточность контурного дешифрирования. Неоднородность структуры лесотаксационных выделов предопределяет наличие в границах одного выдела пикселей нескольких кластеров классификации (рис. 4). Поэтому в качестве данных для сравнения могут быть использованы не все лесотаксационные выделы ТУ. Требуется отбор по преобладанию в пределах выдела пикселей одного кластера классификации изображения.

Количество кластеров классификации обосновывается, с одной стороны, разнообразием лесных сообществ, которое можно оценить посредством анализа типологической и возрастной структуры лесов, с другой – возможностью



- I.1 – выровненные местоположения с высотой менее 300 м
- I.2 – северные склоны местоположения с высотой менее 300 м
- I.3 – южные склоны местоположения с высотой менее 300 м
- II.1 – выровненные местоположения с высотой более 300 м
- II.2 – северные склоны местоположения с высотой более 300 м
- II.3 – южные склоны местоположения с высотой более 300 м

Рис. 2. Страты местоположений ТУ, полученные по материалам ЦМР.

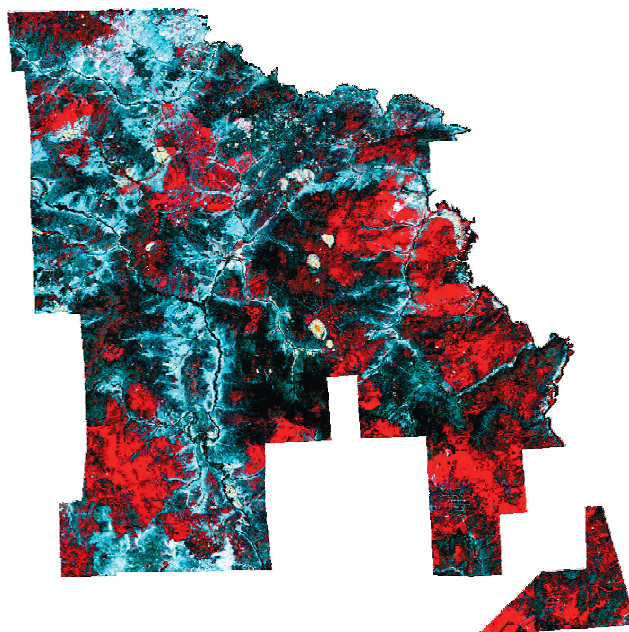


Рис. 3. Изображение территории ТУ на космическом снимке Landsat 5.

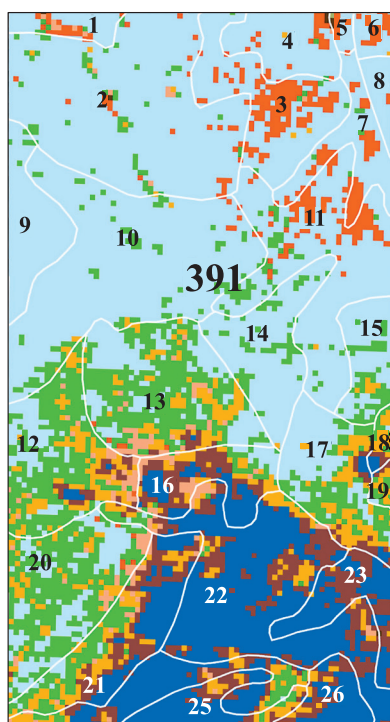


Рис. 4. Кластеры пикселей (показаны разными цветами) на фоне контурного дешифрирования лесотаксационных выделов (на примере квартала № 391).

визуального сопоставления таксационных описаний с палитрой цветов снимка. Чтобы обеспечить сравнимость результатов дешифрирования, использовали одни и те же кластеры классификации и выборку лесотаксационных выделов. При средней площади 30 га общее число лесотаксационных выделов ТУ ~ 2700, выборочных лесотаксационных выделов (наблюдений) 573; заданное количество кластеров классификации изображения 10 (рис. 5). Сравним: в работе В. И. Сухих (2008) 8 кластеров (далее их количество было уменьшено до пяти).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При сопоставлении результатов дешифрирования с наземными материалами появляется возможность получения оценок по всем показателям, фигурирующим в описаниях лесотаксационных выделов. По отношению к качественным показателям лесов оценка сводится к установлению факта их совпадения или несовпадения. Представляется важным установить частоту совпадений по принадлежности к определенным категориям земель, обобщенным лесным формациям (светло- и темнохвойной, лиственной, кустарниковой) и насаждениям (по преобладающим древесным породам). Не-

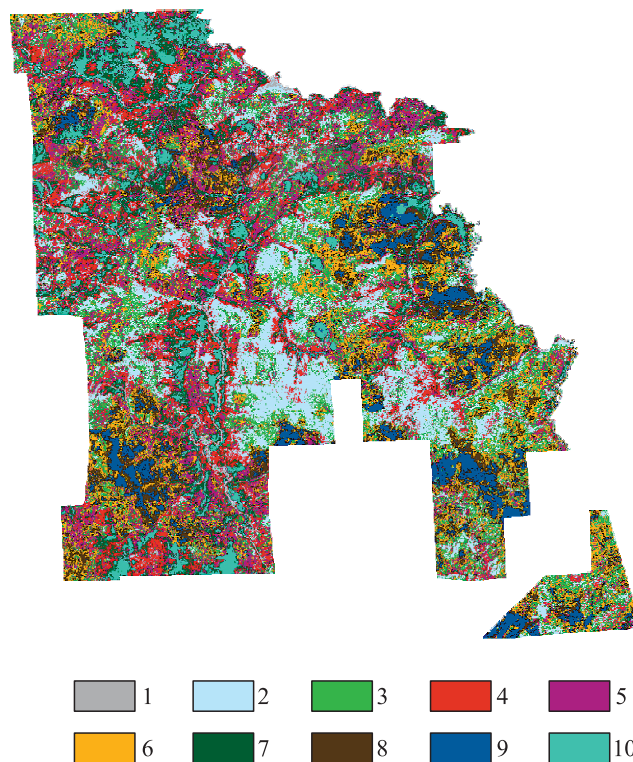


Рис. 5. Кластеры пикселей изображения ТУ.

совпадения перечисленных качественных показателей можно трактовать как грубые ошибки дешифрирования. К основным таксационным показателям, имеющим размерность, относятся: полнота древостоев, средние значения возраста и высоты элементов леса. По отношению к количественным показателям оценка сводится к выявлению меры их изменчивости; среднее квадратическое отклонение при этом отождествляется со случайной ошибкой дешифрирования методом классификации пикселей изображения.

Оказалось, что отдельным кластерам отвечают как неоднородные структуры местоположений, так и не совпадающие по описаниям лесотаксационные выделы. Сочетание выровненных и склоновых местоположений в пределах лесотаксационного выдела подтверждает в первую очередь несовершенство контурного дешифрирования и только потом – различие их таксационных описаний. Отдельным кластерам отвечают не только древостои, различающиеся по породному составу, но и лесные формации и даже категории земель. В качестве примера: 1-й кластер представляют светлохвойные и лиственные насаждения, болота, реки и озера (см. фрагмент табл. 1, полный текст табл. 1 – в электронном приложении к статье: <http://сибирскийлеснойжурнал.pf/articles/add/>).

Таблица 1 (фрагмент). Лесотаксационная характеристика выделов (наблюдений) и их приуроченность к кластерам пикселей изображения и стратам местоположений

Клас-тер	№ квартала	№ выдела	Индекс страты местоположения						Площадь, га	Породный состав древостоя; категория земель	Главная порода	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Полнота
			I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	II.3							
1	399	34	+					9	4С2Л4Б	С	70	14	14	0.7	
1	399	39	+					15	Река						
1	386	6	+	+				30	3Л1С2Е4Б	Л	30	7	6	0.6	
1	396	2	+	+	+			15	4С3Л3Б	С	100	21	26	0.6	
1	397	8	+	+	+			13	9С1Б	С	150	20	24	0.6	
1	389	3	+					213	Болото						
1	389	38	+					9	Река						
1	388	16	+		+			15	8Л2Б+Е	Л	150	21	24	0.8	
1	387	18	+					3	10Л	Л	180	23	24	0.6	
1	422	14	+					22	10Л+Е	Л	230	23	28	0.5	
1	422	31	+	+				24	8Л2Е	Л	200	18	28	0.4	
1	422	36	+					19	Река						
2	206	3				+		35	4Л2С2Е1Б1ОС	Л	180	24	28	0.8	
2	210	24				+		26	6Л2Е1С1Б	Л	180	21	28	0.8	
2	241	17		+				64	5Л2С1Е1Б1ОС	Л	130	20	20	0.8	
2	241	19	+	+				61	8С2Л	С	180	23	26	0.3	
2	259	14		+				98	6Л1С1К1Е1Б	Л	160	20	22	0.8	
2	259	15	+		+			27	5Л2Л2Е1Б	Л	170	21	24	0.9	
2	292	14	+			+		157	8Л2Е	Л	170	25	28	0.9	
2	293	9	+					72	8Л1Е1Б	Л	170	21	24	0.9	
2	293	15	+					92	6С4Л	С	180	23	28	0.6	
2	319	7	+					31	6Л2Е2Б	Л	160	25	28	0.8	
2	320	12					+	54	9Л1Е	Л	190	28	36	0.4	

Категории земель, лесные формации, преобладающие породы насаждений. Привязка выборочных лесотаксационных выделов ТУ к кластерам классификации изображения и стратам местоположений позволяет определить встречаемость категорий земель, видов лесных формаций и преобладающих пород насаждений (см. фрагмент табл. 2, полный текст табл. 2 – в электронном приложении к статье: <http://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/add/>). Поскольку встречаемость выражена по отношению к количеству наблюдений, то появляется возможность сравнения и далее выявления особенностей распределения выборочных лесотаксационных выделов. Перечислим основные.

1. Встречаемость выделов в кластерах последовательно снижается в направлении: категории земель → лесные формации → преобладающие породы древостоев. Для ТУ в целом в 1-м кластере встречаемость насаждений составляет, %: 66, светлохвойной лесной формации – 58, лиственничной – 8, лиственничных выделов – 31, сосновых – 27, березовых – 8.

2. Болота, а тем более озера и реки ТУ расположены на выровненных местоположениях. Поэтому в стратах с наличием склонов фигурируют только насаждения и гари, и представленность этих категорий земель здесь выше. Так, в 10-м кластере (местоположение до 300 м абсолютной высоты на склонах) представленность категории земель «насаждение» составляет 100 %. При наличии на склонах гарей доля насаждений соответственно уменьшается.

3. Кластерам классификации изображения отвечает различная представленность лесных формаций. Так, во 2-м кластере 95 % наблюдений приходится на сосново-лиственничные леса и 5 % – на леса темнохвойной формации; в 7-м кластере присутствуют леса светло- и темнохвойной, лиственной и кустарниковой формаций. С переходом на выровненные местоположения и склоны северной экспозиции наблюдается увеличение насаждений темнохвойной формации. Так, во 2-м кластере доля лесов темнохвойной формации на выровненных местоположениях увеличивается с 5 до 7 %.

Таблица 2 (фрагмент). Распределение количества наблюдений категорий земель, лесных формаций и преобладающих пород насаждений по кластерам классификации изображения и стратам местоположений, %

Кластер	Местоположение	Количество выделов, шт.	Категория земель				Лесная формация				Преобладающая порода насаждения						
			насаждение	болото	озеро, река	гарь	темно-хвойная	светло-хвойная	лиственная	кустарник	Л	С	Б	Ос	П	Е	К
1	ТУ	26	66	12	22			58	8		31	27	8				
	I.1	25	64	12	24			56	8		32	24	8				
	I.2	7	100					100			29	71					
	I.3	3	100					100			33	67					
2	ТУ	92	100				5	95			82	13			3	1	1
	I.1	15	100				7	93			80	13				7	
	I.2	20	100					100			85	15					
	I.3	5	100					100			100						
	II.1	46	100				9	91			76	15			7		2
	II.2	27	100				4	96			81	15			4		
	II.3	16	100					100			88	12					
3	ТУ	60	100				2	96	2		42	54	2		2		
	I.1	11	100					100			82	18					
	I.2	15	100					100			33	67					
	I.3	8	100					100			63	37					
	II.1	24	100				4	92	4		46	46	4		4		
	II.2	22	100					100			36	64					
	II.3	14	100					100			29	71					

Примечание к табл. 1 и 2. Л – лиственница сибирская *Larix sibirica*; С – сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*; Б – береза бородавчатая *Betula verrucosa*; Е – ель сибирская *Picea obovata*; Ос – осина обыкновенная *Populus tremula*.

4. По данным массовой таксации средний породный состав древостоя описывается формулой 3.4Л2.4С2.0Б1.2Е0.5П0.4Ос0.1К. Явное преобладание лесов светлехвойной формации характерно для лесорастительных условий Приангарского округа южно-таежных лесов. Согласно описаниям лесотаксационных выделов, насаждения ТУ отличаются разнообразием породного состава и их процентным соотношением. Так, в 6-м кластере 37 % наблюдений приходится на лиственничные насаждения, 43 – на сосновые, 18 – на березовые и 2 % – на осино-вые. Отчасти разнообразие породного состава объясняется расположением выдела одновременно на выровненных и склоновых местоположениях (см. табл. 1, рис. 3). Поэтому с переходом к стратам местоположений соотношение представленности насаждений по преобладающим породам меняется. Так, еловые насаждения на выровненных местоположениях (поймы рек), относящиеся ко 2-му кластеру, увеличивают свою долю с 1 до 7 %. В распределении сосняков и лиственничников по кластерам классифи-

кации изображения на территории ТУ выраженной зависимости не наблюдается.

По отношению к лесотаксационному выделу каждый случай несовпадения категории земель, преобладающей породы древостоя должен рассматриваться как грубая ошибка, но по отношению к пикселю изображения этого утверждать нельзя. Наличие по кластерам классификации изображения разноименных категорий земель, лесных формаций и насаждений лишь отчасти можно объяснить ошибками таксации. Однако следует признать, что при этом фиксируется факт пусть относительной, но все же тождественности отображения на снимке растительного покрова. Такое состояние возможно для выделов, которые могут быть описаны двояко, например: насаждениями или гарями, насаждениями или болотами. Насколько такого рода пограничное состояние соответствует действительности, невозможно определить посредством сравнения с описанием лесотаксационного выдела. Здесь требуются более точные данные наземных обследований, и в этом качестве можно было бы

Таблица 3 (фрагмент). Средние, максимальные и минимальные значения возраста, высоты деревьев и полноты насаждений по кластерам классификации изображения и стратам местоположений

Клас-тер	Местопо-ложение	Лиственница									Сосна								
		\bar{A}	A_{\min}	A_{\max}	\bar{h}	h_{\min}	h_{\max}	\bar{P}	P_{\min}	P_{\max}	\bar{A}	A_{\min}	A_{\max}	\bar{h}	h_{\min}	h_{\max}	\bar{P}	P_{\min}	P_{\max}
1	ТУ	161	30	230	19.6	7	23	0.56	0.4	0.8	127	70	170	18.4	14	21	0.59	0.5	0.7
	I.1	161	30	230	19.6	7	23	0.56	0.4	0.8									
2	ТУ	172	50	220	23.3	13	28	0.73	0.3	1.0	160	90	200	20.8	15	23	0.61	0.3	1.0
	I.1	166	140	200	23.1	21	25	0.71	0.5	0.9									
	I.2	154	50	200	22.8	13	27	0.69	0.3	0.9									
	II.1	175	130	220	23.0	20	26	0.74	0.5	1.0	160	90	200	21.1	17	23	0.60	0.5	0.7
	II.2	183	130	220	24.3	20	28	0.77	0.4	1.0									
	II.3	191	150	220	25.1	23	28	0.77	0.5	0.9									
3	ТУ	177	140	220	22.8	17	27	0.72	0.4	0.9	147	50	210	19.1	12	23	0.69	0.5	1.0
	I.1	180	150	220	23.1	21	27	0.70	0.6	0.8									
	I.2										151	80	190	18.5	15	23	0.68	0.5	1.0
	II.1	179	150	220	22.9	21	25	0.75	0.4	0.9	146	55	210	19.6	14	23	0.70	0.5	0.9
	II.2	171	150	200	23.4	22	24	0.75	0.6	0.9	146	55	180	19.8	14	23	0.71	0.5	1.0
	II.3										133	50	180	18.8	12	23	0.73	0.5	1.0
4	ТУ	175	110	220	22.0	17	26	0.66	0.4	0.8	163	90	250	20.3	17	24	0.57	0.3	0.8
	I.1	179	110	220	22.4	17	26	0.68	0.5	0.8	180	130	250	20.8	17	24	0.53	0.3	0.8
	I.2	163	110	190	20.9	17	23	0.61	0.4	0.7	172	120	250	19.7	17	24	0.52	0.3	0.7
	I.3	178	160	200	21.7	18	24	0.61	0.4	0.8	160	120	250	20.3	18	24	0.51	0.3	0.7
	II.1										164	90	220	21.0	17	23	0.59	0.4	0.7
5	ТУ	157	50	200	20.3	11	25	0.63	0.4	0.8	148	30	190	18.1	6	23	0.58	0.3	0.9
	I.1	161	80	200	20.4	15	24	0.66	0.5	0.8	146	70	190	17.7	13	21	0.57	0.4	0.6
	I.3	152	50	190	20.9	11	24	0.60	0.4	0.8									

использовать описания пробных площадей Государственной инвентаризации лесов.

Средние возраст и высота элементов леса, относительная полнота древостоя – это основные таксационные показатели, по значениям которых оцениваются производительность и запас древостоя. По описаниям насаждений лесотаксационных выделов (см. табл. 1) для лиственницы, сосны и березы оказалось возможным определить их средние, максимальные и минимальные значения (по Г. Ф. Лакину (1973) – размах вариации), а также стандартное отклонение. Результаты сгруппированы по кластерам классификации изображения и стратам местоположений (см. фрагменты табл. 3, 4, полный их текст в приложении: <http://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/add/>).

Значения средних возрастов сосны и лиственницы свидетельствуют о преобладании на ТУ спелых и перестойных древостоев. По минимальным величинам возраста, который у сосны составляет 25, у лиственницы 30 лет, можно делать вывод о наличии здесь более молодых сосново-лиственничных древостоев предположи-

тельно пирогенного происхождения. Возрастной диапазон березы – от 25 до 90 лет. Различий возрастной структуры древостоев по кластерам классификации изображения как в целом по ТУ, так и по стратам местоположений не наблюдается. Другими словами, возрастная структура сосново-лиственничных и березовых насаждений методом классификации их изображений не дешифрируется. При оценке возраста составляющих пород древостоя будет допускаться случайная ошибка, равная стандартному отклонению от среднего возраста. Для насаждений ТУ случайная ошибка для лиственницы находится в пределах от 21 до 55 лет, сосны – от 33 до 79, березы – до 20 лет (см. табл. 3).

В распределении средних высот лиственницы, сосны и березы и их стандартных отклонениях по кластерам классификации изображения и стратам местоположений также не просматривается какой-либо зависимости. Отсюда следует, что высота деревьев не влияет на изображение лесного полога на спутниковых снимках и поэтому методом классификации дешифрироваться не может. При отнесении высот деревьев

Таблица 4 (фрагмент). Средние значения и стандартное отклонение возрастов, высот деревьев и полноты насаждений по кластерам классификации изображения и стратам местоположений

Клас-тер	Местопо-ложение	Лиственница						Сосна					
		\bar{A}	σ_A	\bar{h}	σ_h	\bar{P}	σ_P	\bar{A}	σ_A	\bar{h}	σ_h	\bar{P}	σ_P
1	ТУ	161	55	19.6	5.1	0.56	0.11	127	37	18.4	2.6	0.59	0.08
	I.1	161	55	19.6	5.1	0.56	0.11						
2	ТУ	172	28	23.3	2.4	0.73	0.14	160	34	20.8	2.5	0.61	0.16
	I.1	166	19	23.1	1.5	0.71	0.14						
	I.2	154	37	22.8	3.3	0.69	0.16						
	II.1	175	20	23.0	1.8	0.74	0.11	160	33	21.1	2.0	0.60	0.08
	II.2	183	22	24.3	1.8	0.77	0.14						
	II.3	191	22	25.1	1.3	0.77	0.10						
3	ТУ	177	22	22.8	1.8	0.72	0.11	147	44	19.1	3.1	0.69	0.16
	I.1	180	22	23.1	1.6	0.70	0.07						
	I.2							151	45	18.5	2.6	0.68	0.20
	II.1	179	23	22.9	1.2	0.75	0.13	146	42	19.6	2.7	0.70	0.13
	II.2	171	15	23.4	0.9	0.75	0.09	146	39	19.8	3.1	0.71	0.16
	II.3							133	49	18.8	3.6	0.73	0.16
4	ТУ	175	23	22.0	2.2	0.66	0.09	163	36	20.3	1.8	0.57	0.13
	I.1	179	24	22.4	2.3	0.68	0.07	180	40	20.8	1.7	0.53	0.15
	I.2	163	28	20.9	2.0	0.61	0.11	172	44	19.7	2.1	0.52	0.12
	I.3	178	13	21.7	1.7	0.61	0.10	160	41	20.3	1.8	0.51	0.11
	II.1							164	38	21.0	1.9	0.59	0.08
5	ТУ	157	33	20.3	3.6	0.63	0.11	148	46	18.1	4.0	0.58	0.15
	I.1	161	28	20.4	2.8	0.66	0.08	146	36	17.7	2.3	0.57	0.07
	I.3	152	40	20.9	3.8	0.60	0.11						

Примечание к табл. 3 и 4. \bar{A} – средний возраст, лет; A_{\max} – максимальный возраст, лет; A_{\min} – минимальный возраст, лет; σ_A – стандартное отклонение по возрасту, лет; \bar{h} – средняя высота, м; h_{\max} – максимальная высота, м; h_{\min} – минимальная высота, м; σ_h – стандартное отклонение по высоте, м; \bar{P} – средняя полнота; P_{\max} – максимальная полнота; P_{\min} – минимальная полнота; σ_P – стандартное отклонение полноты.

составляющих пород к определенным кластерам будет допускаться случайная ошибка, равная стандартному отклонению от средней высоты. Для насаждений ТУ случайная ошибка для лиственницы находится в пределах от 0.9 до 5.1 м, сосны – от 1.6 до 6.3, березы – от 0.9 до 5.1 м (см. табл. 4).

Относительная полнота, согласно нормативам таксации древостоев, не может превышать значения 1.0 – полноты нормального насаждения. Для расчетов запасов древостоя при проведении массовой таксации Хребтовского лесничества использовалась стандартная таблица ЦНИИЛХ. В действительности лесорастительные условия южной тайги Приангарья могут продуцировать большие значения и полноты, и, следовательно, запасов древостоев. Поэтому наблюдаемое снижение полноты лиственных древостоев, группирующихся в 1, 7, 9, 10-м кластерах, должно иметь объяснение. Заметим, что именно в этих кластерах находится наибольшее число болот и гарей (см. табл. 2).

Очевидно, что и насаждения здесь заболочены или пройдены пожаром; в обоих случаях происходят изреживание древостоя и снижение полноты. Получается, что изображение на спутниковом снимке содержит информацию о полноте древостоя. Следовательно, при дешифрировании методом классификации есть возможность корректировать полноту древостоя. Равно как для возраста и высоты, случайная ошибка оценки полноты по кластерам классификации изображения будет равна стандартному отклонению от их среднего значения. Для ТУ случайная ошибка полноты для сосняков и лиственничников достигает значения 0.22, для березняков – 0.24 (см. табл. 4).

Полученные величины ошибок полноты древостоев, возраста и высоты деревьев превышают нормативно установленные даже для наименее подробного III разряда лесоустройства. Снижения величин случайных ошибок с переходом к классификации по отдельным стратам местоположений не наблюдается.

Источники ошибок. Спектральные яркости различных объектов на поверхности Земли даже в пределах одного спутникового снимка зачастую пересекаются, что и является определяющей причиной ошибок дешифрирования. Величины этих ошибок зависят от многих причин, которые по происхождению условно можно разделить на природные и технические. Основные причины технического характера: разрешающая способность сенсоров спектральных каналов съемки, выбор определенной комбинации каналов для получения мультиспектрального изображения и алгоритма улучшения изображения. Основные причины природного характера: состояние атмосферы, сезон года и время проведения съемки, географическое положение, разнообразие растительного покрова и особенности морфологии рельефа местности.

Поскольку территория ТУ расположена в пределах одной сцены LT51400182005165BJC00 (Landsat 5, август 2005 г.), то требование «равенства всех прочих условий» при проведении процедуры классификации пикселей изображения выполняется. В наличии равенство технических и природных условий съемки. **Поэтому ошибки дешифрирования будут полностью определяться используемым алгоритмом классификации плюс изменчивостью таксационных показателей объектов, отнесенных к одному кластеру.**

При использовании снимков более высокого пространственного разрешения или гиперспектральных создаются дополнительные возможности классификации, связанные с появлением новых методов извлечения признаков (Шовенгердт, 2010). Количество классов будет увеличиваться, а изменчивость таксационных показателей уменьшаться. Однако технически достижимое количество классов классификации изображения остается на несколько порядков меньше числа возможных вариантов сочетаний величин лесотаксационных показателей. Классы сохраняются, сохраняются и изменчивость лесотаксационных показателей, и ошибки дешифрирования, выполняемого методами классификации пикселей спутникового снимка.

Минимальная изменчивость достигается, когда количество кластеров равно количеству выделов. Однако в этом случае уже не требуется классификация пикселей снимка, а оценка таксационных показателей может производиться отдельно в каждом выделе. В. И. Архипов и др. (2014) развивают именно такое направление

дешифровочной таксации. Их технология «от съемки – к проекту» основана на использовании материалов цифровых аэросъемок, специального программно-аппаратного обеспечения и научно-производственного опыта лесотаксационного дешифрирования, накопленного в лесоустроительных предприятиях за время их работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ориентируясь на полученные величины ошибок, допускаемых при оценке лесотаксационных показателей, можно утверждать, что дешифрирование методом классификации пикселей изображения снимка Landsat 5 применимо только для мелкомасштабного картографирования. Включение в процесс дешифрирования дополнительных возможностей, которыми располагают другие способы дистанционного зондирования земной поверхности, позволяет повысить качество результатов. В первую очередь следует использовать ЦМР, поскольку именно формы рельефа, связанные с ними микроклиматические особенности и гидрологический режим почв в основном формируют лесорастительные условия.

Во ФГУП «Рослесинфорг» разрабатываются алгоритмы автоматизированного определения таксационных показателей насаждений, создается методика выявления состояния лесов по аэрокосмическим снимкам (Манович и др., 2013). Для методов обработки спутниковых изображений требуются дополнительные технологические поправки, которые позволили бы скорректировать результаты дешифрирования. Пока же использование методов классификации для инвентаризации лесов в их современном виде рекомендовать нельзя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-05-000-88.

Адрес приложения: <http://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/add/> Примечания к таблицам см. в тексте статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архипов В. И., Черниховский Д. М., Березин В. И. Опыт таксации лесов дешифровочным способом на основе современного программно-аппаратного обеспечения и цифровых аэроснимков нового поколения // Сиб. лесн. журн. 2014. № 5. С. 29–37.

- Барталев С. А., Гагарин Ю. Н., Ершов Д. В., Лукина Н. В., Луян Е. А.* Потенциал применения методов дистанционного зондирования из космоса для совершенствования государственной инвентаризации лесов России // Всерос. совещ. по использованию материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды (17–18 июля 2013 г., Брянск). <http://www.rosleshoz.gov.ru/media/event/52/08>
- Брюханов Н. В., Фарбер С. К., Кузьмик Н. С.* Методика выявления страт местоположений, сопряженных с типами лесов южной тайги Красноярского Приангарья // VIII Междунар. науч. конгр. «Гео-Сибирь–2012». Т. 4. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. мат-лов VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2012. С. 104–108.
- Вершовский Е. А.* Разработка методов и алгоритмов кластеризации мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли. 2010. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-i-a>
- Ембаев И. А., Абросимов А. В.* Инвентаризация охотничьих угодий по результатам классификации мультиспектральных изображений // GEOMATICS. 2009. № 3. С. 33–39.
- Князева С. В.* Картографо-аэрокосмический мониторинг лесов национальных парков: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ВНИИМ, 2006. 26 с.
- Коротков И. А.* Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 1994. С. 29–47.
- Лакин Г. Ф.* Биометрия. Учеб. пособ. для университетов и педагогических институтов. М.: Высш. школа, 1973. 343 с.
- Манович В. Н., Гук А. П., Евстратова Л. Г.* Методы дешифрирования многоспектральных аэрокосмических снимков при решении задач таксации лесов // Государственный лесной реестр, государственная инвентаризация лесов и лесоустройство: сб. мат-лов 3-й Междунар. науч.-практ. конф., 29 ноября 2012 г., Новосибирск. М.: ФГУП «Рослесинфорг», 2013. С. 63–72.
- Маркс А.* Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye // GEOMATICS. 2011. № 3. С. 58–68. http://geomatrica.ru/pdf/2011_03/9marks_monitoring_lesov
- Методы и способы классификации космических изображений, полученных со спутника. 2011. http://otherreferats.allbest.ru/geography/00111456_0.html
- Мирков Д.* Фотографии со спутника Landsat 8 в свободном доступе // Хакер. Электронный журн. Вып. 31.03.2013. <http://xaker.ru/60714>
- Мурзакматов Р. Т., Кошкарлова В. Л., Фарбер С. К.* Ординация типов леса Улугхемского лесорастительного округа Тувы по показателям климата и рельефа // Сиб. лесн. журн. 2014. № 3. С. 107–116.
- Мурзакматов Р. Т., Фарбер С. К.* Картирование растительных сообществ с использованием результатов их ординации по показателям климата и рельефа (на примере лесов Тувы) // Лесные экосистемы Центрально-Азиатского региона в условиях глобального изменения климата и антропогенного пресса: сб. мат-лов Междунар. симп., 25–29 авг. 2014 г., Бишкек / Под ред. Р. Т. Мурзакматова. Красноярск: Дарма-печать, 2014. С. 120–123.
- Никитина Ю. В., Никитин В. Н.* Разработка методики автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков среднего разрешения для определения породного состава лесных насаждений // VII Междунар. науч. конгр. ГЕО-Сибирь–2011. Т. 3. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью. Ч. 2: сб. мат-лов VII Междунар. науч. конгр., 19–29 апр. 2011 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2011. С. 180–182.
- Пузаченко М. Ю., Котлов И. П., Черненькова Т. В.* Технологическая схема мониторинга природных объектов с использованием ДДЗ и ГИС-технологий // Мониторинг биологического разнообразия лесов России. М.: Наука, 2008. С. 347–359.
- Сухих В. И.* Основные направления развития дистанционных методов изучения лесов и оценки их состояния в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 352–357.
- Фарбер С. К., Брюханов Н. В.* Материалы массовой таксации и государственной инвентаризации лесов: характеристика расхождений, причины, анализ // Сиб. лесн. журн. 2014. № 5. С. 16–28.
- Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование // Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- Farr T. G., Hensley S., Rodriguez E., Martin J., Kobrick M.* The shuttle radar topography mission //

CEOS SAR Workshop. Toulouse, 26–29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361–363.
Sharing Earth Observation Resources. eoPortal Directory: Landsat-8 / LDCM (Landsat Data Continuity Mission), 2014. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/1/landsat-8-ldcm>

Quinn J. W. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM/ETM+, 2001. <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>

ERRORS OF FOREST INTERPRETATION IN ANGARA RIVER REGION BY THE METHOD OF SATELLITE SCENE PIXEL CLASSIFICATION

S. K. Farber¹, N. S. Kuz'mik¹, N. V. Bryukhanov²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Branch of the Federal State Budgetary Enterprise «Roslesinforg» «Vostsiblesproekt» N. K. Krupskaya str., 42, Krasnoyarsk 660062 Russian Federation

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, natalia_5791@mail.ru, lespres@post.kts.ru

A purpose of research is to identify errors in interpretation of satellite images of forests based on image pixel classification by spectral brightness. The Landsat 5 satellite image was used (August, 2005). The results of interpretation were compared with data of forest estimation, i.e. descriptions of forest plots and maps of dominated species. The forest area made up 80.8 thousand ha; quantity of plots was about 2700, including 573 sampling plots; specified number of clusters classification image – 10. As a result, there were intolerable errors in land categories, forest formations and dominated species on the level of forest plot generalization. Thus, interpretation of forest land images having applied a method of classification of spectral brightness pixels could be applied for small scale mapping only. It is supposed that inclusion of spatial analysis of relief digital simulation in the process of interpretation will improve a quality of performance. Stratum of locations were formalized by means of registration of absolute altitudes, slopes, and exposures. Spatial analysis was carried out on the base of Shuttle Radar Topographic Mission database. Errors of forest stand density, average ages and heights of trees exceed norms, which were specified for the least detailed third category of forest inventory. In such a case, there is not error reduction considering single stratum of locations. Categories of forest lands and variation of forest estimation indicates do not depend on a picture of satellite images. Therefore, achieving required accuracy of interpretation having applied methods of imagery classification and transformation, i.e. by use of the normalized vegetative index, does not seem possible. Consequently, applying the actual methods of satellite image classification in forest inventory cannot be recommended.

Keywords: *satellite images, spectral brightness, image pixel classification, stratum of locations, forest lands, forest estimation indicates.*

How to cite: Farber S. K., Kuz'mik N. S., Bryukhanov N. V. Errors of forest interpretation in Angara river region by the method of satellite scene pixel classification // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 4: 56–67 (in Russian with English abstract).