Дешифрирование растительности северо-западного Приладожья по космической съёмке высокого разрешения с использованием ординации по комплексу морфолого-физиологических показателей

А. Н. Афонин, Ю. В. Соколова, Н. Н. Бардаков, И. О. Сахаров

Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: a.afonin@spbu.ru

Проведено дешифрирование растительности по снимкам высокого разрешения QuickBird-2 (2,4 и 0,6 м), GeoEye-1 (2 и 0,5 м) и WorldView-2 (2 и 0,5 м). В качестве дешифровочных признаков использованы выявляемые на снимках морфолого-физиологические свойства объектов: морфометрические характеристики проекции растительного покрова (крон деревьев) на снеговой покров, которые количественно оценивали по отражению растительности на ранневесеннем снимке, и интегральный показатель фотосинтетической активности растительности, которую оценивали по индексу NDVI, рассчитываемому по летнему снимку. Рассмотрены концептуальные и методические аспекты прямого экспертного дешифрирования растительности по снимкам высокого разрешения методами классификации с использованием инструментов растровой алгебры. Валидация результатов дешифрирования материалами наземного обследования показала 78-100%-ю точность дешифрирования при картировании разных типов растительности, классифицированной на 6 классов уровня формаций и групп формаций. Учёт большего количества морфолого-физиологических параметров позволяет повысить точность дешифрирования. Вместе с тем следует отметить некоторые проблемы использования снимков субметрового разрешения. Например, при дешифрировании растительности по снимкам высокого разрешения возникают проблемы недостаточно точной геометрической коррекции предоставляемых снимков и неодинаковости угла наклона камеры при проведении съёмки. Это не позволяет проводить прецизионное сравнение разновременных снимков и использовать в полной мере возможности дешифрирования по разновременной динамике (change detection) и текстурным особенностям поверхности растительного покрова на пиксельном уровне. В связи с этим необходимым этапом дешифрирования снимков высокого разрешения методами классификации с использованием инструментов растровой алгебры является их генерализация.

Ключевые слова: дешифрирование, растительность, данные дистанционного зондирования, снимки высокого разрешения, методика, дешифровочные признаки, морфолого-физиологические показатели, ГИС, классификация, растровая алгебра, генерализация

Одобрена к печати: 20.11.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-147-156

Введение

Вопрос об эффективности и точности использования классификационного метода дешифрирования лесов и других растительных объектов, основанного на автоматизированной классификации пикселей изображения по спектральной яркости, для решения различного рода задач остаётся дискуссионным (Малышева, 2012; Пузаченко и др., 2008; Фарбер и др., 2016). Очевидно, что ответ на данный вопрос зависит от решаемой задачи, используемых материалов и методов.

В предлагаемой работе нами проведено дешифрирование территории с высокой степенью фрагментации растительного покрова экспертным классификационным ординационным методом по снимкам высокого разрешения и оценена точность проведённого дешифрирования. Применённый способ может быть классифицирован как экспертный классификационный по методу параллелепипеда (Лурье, 2008).

Территорией обследования стал участок северо-западного Приладожья в районе Приладожской учебно-научной станции СПбГУ. Космическая съёмка высокого разрешения была получена в рамках гранта от DigitalGlobe Foundation. По космическим снимкам была выбрана тестовая территория площадью 4 км², и в ходе полевого периода 2017 г. проведено наземное изучение её растительности. В ходе наземного обследования были сделаны 90 геоботанических описаний.

При дешифрировании были использованы преимущественно два морфолого-физиологических параметра растительности: морфометрические характеристики проекции растительного покрова (крон деревьев) на снеговой покров, которые количественно оценивали по отражению растительности на ранневесеннем снимке, и интегральный показатель фотосинтетической активности растительности, которую оценивали по индексу NDVI, рассчитываемому по летнему снимку. Учёт всего лишь двух параметров тем не менее позволил провести довольно точное дешифрирование шести классов растительных объектов и с высокой степенью вероятности различить еловые, елово-сосновые, сосновые, сосновые скальные, лиственные леса, а также травянистые сообщества.

Характеристика снимков высокого разрешения и предварительная обработка данных

В рамках гранта DigitalGlobe Foundation были получены три снимка высокого разрешения. Краткие характеристики снимков приведены в *табл. 1*.

Название спутника	Пространственное разрешение (мультиспектральные / панхроматические), м	Количество каналов для мультиспектральных данных	Дата съёмки	
QuickBird-2	2,4 / 0,6	4	13 мая 2012 г.	
GeoEye-1	2,0 / 0,5	4	7 августа 2013 г.	
WorldView-2	2,0 / 0,5	8	8 апреля 2012 г.	

Таблица 1. Краткая характеристика используемых снимков

Для всех снимков была уточнена геопривязка. В первую очередь уделялось внимание относительной привязке снимков между собой. Мультиспектральные каналы снимка за август прошли радиометрическую коррекцию (Kuester, 2017): исходные значения пикселей (DN) были пересчитаны в значения относительного отражения (Apparent Reflectance) (Шовенгердт, 2010). По откорректированным каналам снимка был рассчитан индекс NDVI. К растру NDVI, а также панхроматическому каналу снимка за апрель была применена медианная фильтрация с размером окна фильтра 7 и 29 пикселей соответственно. Классификация обработанных снимков основывалась на задании пороговых значений, которые были установлены в результате экспертной оценки.

Краткая характеристика растительности территории заказника «Кузнечное»

Северо-западное Приладожье относится к зоне южной тайги. Рельеф сельговый, характеризующийся чередованием невысоких гранитных гряд — сельг — и межсельговых понижений. Коренными типами растительности являются хвойные: еловые и сосновые леса. Еловые доминируют на достаточно мощных почвах в нижних частях склонов сельг и межсельговых понижений. В ходе естественного сукцессионного процесса сосна вытесняется елью и доминирует только на участках, неблагоприятных для роста ели. Таких в северо-западном Приладожье немало — это вершины и верхние части склонов сельг, характеризующиеся маломощным почвенным покровом и переменным режимом увлажнения. Территория

в сравнительно недавнем времени довольно активно использовалась в сельском хозяйстве: участки с наиболее плодородной почвой и удобные в отношении рельефа были заняты сенокосами и пастбищами, а иногда и распахивались. В последние десятилетия сельскохозяйственная деятельность на территории обследования угасала и сегодня почти полностью отсутствует. В таких условиях происходит естественная сукцессия, когда ранее существовавшие луга постепенно зарастают кустарниками и лиственными породами деревьев: осиной, ольхой, берёзой. На последующих стадиях сукцессии лиственные леса сменяются хвойными, прежде всего еловыми. Но на современной стадии сукцессии прежние луга, а значит и межсельговые понижения, заняты преимущественно молодыми лиственными лесами. Для растительности характерна высокая степень фрагментированности, что создаёт проблемы при её дешифрировании.

Биоэкологические особенности дешифрируемых объектов, выявляемые на снимках высокого разрешения

Хвойные и лиственные леса. При использовании снимков высокого разрешения возможен выбор вариантов дешифрирования. Лиственные хорошо выявляются на летних снимках повышенным уровнем фотосинтеза, что фиксируется индексами NDVI. На августовском снимке лиственные леса характеризуются более высокими значениями NDVI по сравнению с сосновыми и еловыми. Другим естественным признаком при отделении лиственных лесов от хвойных может служить разница в зимнем отражении в каналах видимого света. Проекция крон потерявших листву деревьев на снег характеризуется высокой степенью отражения в панхроматическом канале (далее — панхром) апрельского снимка, тогда как сохранившие хвою деревья поглощают значительную часть света, а отражают значительно меньше. Эта разница в отражении между лиственными и хвойными по ранневесенним снимкам может быть использована в качестве основного или вспомогательного дешифровочного признака. Следует учитывать, что укрытые снегом хвойные также могут характеризоваться высокой степенью отражения. Поэтому дешифрирование по зимним и ранневесенним снимкам за разные даты может проводиться с неодинаковой степенью уверенности. Хороший результат может давать комбинированное разновременное дешифрирование, при котором сравнивается динамика в отражении по зимним и летним снимкам. Например, разность в отражении по красному каналу для зимы и лета максимальна для лиственных и меньше для хвойных.

Еловые и сосновые леса. Перекрытие диапазонов NDVI ельников и сосняков не позволяет уверенно дешифрировать их по значениям летних NDVI. На снимках высокого разрешения полновозрастные ельники хорошо отбиваются от сосняков в каналах видимого света и на панхроме на ранневесенних снимках (рис. 1г, см. с. 150). Это связано с большей сомкнутостью ельников по сравнению с сосняками. Сомкнутые ельники задерживают больше света и меньше отражают по сравнению с сосняками, отражение которых складывается не только из отражения от крон, но и от покрытой снегом поверхности Земли, которая просматривается сквозь разреженный сосновый древостой. На зимних снимках разделение еловых и сосновых лесов может быть проблематичным из-за снега, удерживающегося на кронах деревьев. При большом количестве снега на кронах разница в отражении с крон нивелируется.

Скальные сосновые комплексы. Скальные сосняки представляют отдельный тип ландшафта северо-западного Приладожья. Они широко представлены на грядовых выходах гранитов — сельгах — в верхней их части. Недостаточное увлажнение и малая мощность почвенного покрова приводят к появлению в верхней части сельг специфичной растительности, представленной преимущественно низкорослой сосной, кустарничками, зелёными мхами и лишайниками. На микроповышениях сельг растительность представлена преимущественно сосняком бруснично-вересковым зеленомошно-лишайниковым. В микро- и мезопонижениях сельг, где скапливаются дополнительные запасы влаги и формируется несколько более мощный почвенный слой, растительность сосновая черничная зеленомошная. Сосны в понижениях крупнее и характеризуются несколько более высокой сомкнутостью.

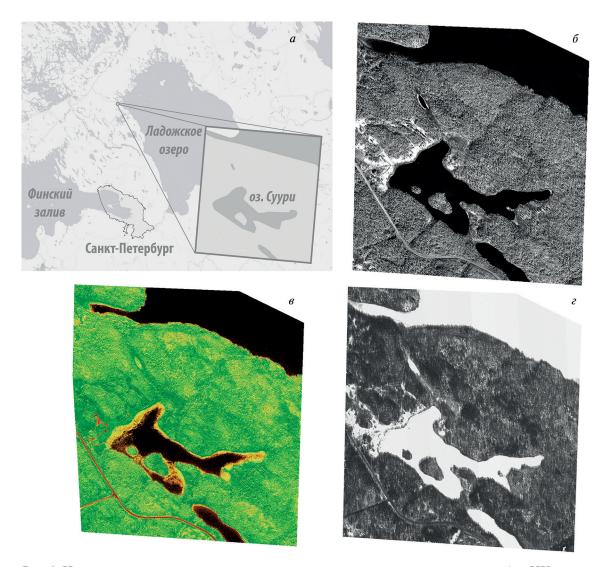


Рис. 1. Используемые данные: a — схема расположения исследуемого участка; δ — ИК-канал снимка за 13 мая 2012 г.; ϵ — NDVI за 7 августа 2013 г.; ϵ — панхроматический канал снимка за 8 апреля 2012 г.

На снимках высокого разрешения можно уловить даже дифференциацию скального комплекса на повышенные и пониженные фрагменты. Скальный комплекс достаточно уверенно дешифрируется по летним снимкам, поскольку характеризуется самыми низкими значениями NDVI. На апрельском панхроме отражение скальных комплексов примерно соответствует отражению сосновых лесов.

Луговые сообщества. Дешифрирование луговых сообществ на снимках высокого разрешения представляет довольно непростую задачу, поскольку на летних снимках по NDVI они очень близки к показателям лиственных лесов. На зимних и ранневесенних снимках показатели отражения лугов несколько выше, чем у лиственных лесов: несмотря на то, что ветви и стволы листопадных деревьев ажурны, их проекция создаёт более тёмный фон по сравнению с отражением от снежного покрова ничем не прикрытых лугов. Дешифрированный классификационным методом на ранневесеннем панхроме в диапазоне отражения луговых сообществ слой является на самом деле комбинированным, поскольку включает в себя, помимо лугов, также территории покрытых снегом озёр и небольшие фрагменты разреженной растительности сельг, участки водной растительности, которые характеризуются сходными значениями отражения. Территория озёр убирается с комбинированного слоя по маске водных объектов, полученной с помощью сегментации майского ближнего инфракрасного канала (Кашкин, Сухинин, 2001). Фрагменты растительности сельг чётко различаются от луговой

диапазоном августовских NDVI, поскольку фотосинтезирующая активность растительности сельг значительно ниже, чем растительности лугов.

Фон травяного покрова, более равномерный и неконтрастный по сравнению с испещрённой тенями древесной растительностью, также делает возможным проводить в субметровом разрешении дешифрирование луговой растительности по текстурным особенностям.

Смешанные леса: хвойно-лиственные и сосново-еловые. Большую часть территории северозападного Приладожья занимают смешанные леса, на которых в разных соотношениях представлены хвойные и лиственные породы. Также в зависимости от мощности почвенного покрова и условий увлажнения в разных соотношениях произрастают сосна и ель. Примесь лиственных пород к хвойным в целом индицируется повышенными значениями NDVI. Кроме того, на панхроме полуметрового разрешения довольно чётко различимы и кроны наиболее крупных листопадных деревьев, что позволяет в перспективе использовать алгоритмы структурного и текстурного дешифрирования для наиболее точного дешифрирования градаций соотношения компонентов хвойных и лиственных лесов. Переходные участки от еловых к сосновым лесам неплохо дешифрируются на апрельском панхроме по промежуточным значениям суммированного отражения крон и заснеженной поверхности.

Дешифрирование

При дешифрировании растительности были использованы два морфолого-физиологических параметра: морфометрические характеристики проекции растительного покрова (крон деревьев) на снеговой покров, которые количественно оценивали по отражению растительности на апрельском панхроме, и интегральный показатель фотосинтетической активности растительности, которую оценивали по индексу NDVI, рассчитываемому по августовскому снимку (см. *рис. 1*). Дешифрирование проводилось классификационным методом по заданным диапазонам отражений.

Значения NDVI, рассчитанные по августовскому красному и инфракрасному каналам, характеризовали интегральную фотосинтетическую активность дешифрируемых классов растительности. Минимальной фотосинтетической активностью — NDVI менее 0,29 — характеризовались антропогенно нарушенные объекты: дороги, строения, вытоптанные участки. Скальные комплексы характеризовались минимальными значениями NDVI среди естественных типов растительности — меньше 0,48. Максимальные NDVI оказались у лугов и лиственных лесов — больше 0,59. Сосновые леса, ельники и промежуточные классы (елово-сосновые, лиственно-еловые и лиственно-сосновые) характеризовались промежуточными значениями NDVI — от 0,48 до 0,59. Распределение растительности по градациям NDVI составило первую ось используемой нами ординационной матрицы (рис. 2, см. с. 152).

Апрельский панхроматический снимок позволил ввести в качестве дополнительного дешифровочного признака морфологические особенности крон деревьев и растительного покрова. Начало апреля 2012 г. отличалось аномально холодной погодой. На дату съёмки снег ещё не стаял, но кроны деревьев освободились от снега. По апрельскому панхрому чётко выделялись малой степенью отражения сомкнутые еловые сообщества — меньше 490. Сосновые леса характеризовались большей степенью отражения — 490—800, при этом елово-сосновые сообщества по степени отражения были близки к еловым лесам — 490—600. Листопадные леса стояли без листвы, и их прозрачные кроны хорошо пропускали отражённый от снега свет — 800—1600. Самой высокой степенью отражения характеризовались укрытые снегом луга, так же как беспрепятственно отражающий свет снег, лежащий на льду озёр, — больше 1600.

Данные по дешифрируемым классам растительности по двум параметрам — характеристике апрельского отражения (панхром) и фотосинтетической активности в августе (NDVI) — были представлены в двухмерной ординационной матрице (см. *puc. 2*). По комплексной характеристике по двум параметрам дешифрируемые объекты были разнесены по классам в квадратах матрицы.

				NDVI, август			
				Сосняки скальные, антропоген, вода	Хвойные	Лиственные, хвлиств., луга	
		10	20	30			
				<0,48	0,48-0,59	>0,59	
Отражение на апрельском панхроме	Луга, озёра, антропоген	5	>1600	15 Озёра, укрытые снегом, и антропоген	25 Водная растительность	35 Луга	
	Листв., хвлиств., сосн. скальные	4	800–1600	14 Сосняки скальные и антропоген	24 Лиственно- сосновые	34 Лиственные	
	Сосняки, листв., сосн.скальные	3	008-009	13 Сосняки скальные	23 Сосновые	33 Лиственные и сосново-лиственные	
	Елово-сосновые, елово-листв.	2	490–600	12 Елово- сосновые	22 Елово- сосновые	32 Лиственно-елово- сосновые	
	Ельники, листвеловые	1	<490	11 Еловые	21 Еловые и сосново-еловые	31 Еловые и лиственно-еловые	

Рис. 2. Ординационная матрица классов растительности, дешифрируемых по двум морфолого-физиологическим показателям

Цвет дан в соответствии с легендой карты и указывает, к какому классу объектов легенды отнесён данный комплексный диапазон. Цифрами в клетках матрицы указаны идентификаторы классов объектов, полученные сложением идентификаторов их подклассов по диапазонам значений апрельского отражения и NDVI.

Дешифрирование классов растительности проводилось исключительно классификационными методами точно в соответствии с заданными диапазонами весенних отражений проекций крон и значений NDVI в период активной вегетации (на $puc.\ 2$ эти диапазоны указаны), что исключало привнесение субъективных аспектов, обусловленных ручным визуальным дешифрированием.

Выделение фрагментов снимков, соответствующих диапазонам значений того или иного класса, проводилось посредством реклассификаций (Eastman, 2012) по задаваемым нами диапазонам значений. Объединение дешифрированных фрагментов в итоговую карту проводилось с использованием аппарата растровой алгебры.

Следует отметить, что при дешифрировании растительности по снимкам высокого разрешения (СВР) возникают проблемы генерализации. Детализация СВР (пространственное разрешение 0,5–2 м) является избыточной при дешифрировании классов растительности. Действительно, фрагмент елового леса полуметрового разрешения может приходиться как на фрагмент кроны любого дерева (не обязательно ели), входящего в этот класс, так и на просвет в кронах деревьев и не может представлять одновременно всю совокупность, именуемую еловым лесом. В то же время фрагмент ельника 14×14 м будет одновременно представлять совокупность нескольких деревьев и пространства между ними, занятого характерной травянокустарничковой и мохово-лишайниковой растительностью. По такому фрагменту при наземном обследовании можно уверенно классифицировать принадлежность участка к тому или иному типу растительности. По изложенной причине результат дешифрирования растительности по снимкам высокого разрешения должен быть тем или иным способом генерализован. Генерализация была проведена нами в два этапа. На первом этапе информация исходных изображений генерализовалась посредством фильтрации по 14-метровому окну посредством

медианного фильтра. На заключительном этапе дешифрирования все выделы площадью менее $196 \,\mathrm{m}^2$ были включены в доминирующий класс растительности, смежный с генерализуемым фрагментом.

На итоговой карте представлено 6 классов растительности: 1) ельники; 2) елово-сосновые; 3) сосняки; 4) сосняки скальные; 5) лиственные леса; 6) травянистая растительность (puc. 3).

Представление о точности приведённой карты даёт валидация.



 $Puc.\ 3.$ Карта фрагмента растительности северо-западного Приладожья. Классы растительности: 1- ельники; 2- елово-сосновые; 3- сосняки; 4- сосняки скальные; 5- лиственные леса; 6- травянистая растительность

Валидация

Северо-западное Приладожье характеризуется высокой степенью фрагментированности растительности. При этом точность геопривязки снимков — порядка 4 м, а точность определения координат навигатором Garmin ETrex — около 10 м. В связи с высокой фрагментированностью территории и сравнительно невысокой точностью определения координат наземных описаний навигатором валидация результатов дешифрирования затруднена и требует большого количества тестовых точек. В период полевой работы нами было сделано 90 описаний во всех типах дешифрируемых растительных сообществ. В ходе валидации по координатам точек описаний с карты посредством процедуры экстракции были получены значения дешифрированных классов растительности. Валидация была проведена по результатам сопоставления результатов дешифрирования по итоговой карте с точками описаний. В случае полного совпадения класса растительности в точке по карте с наземным описанием результат валидации по точке считали положительным. В случае несовпадения результата наземного описания с экстрагированным по карте определяли расстояние от точки до границы ближайшего соответствующего наземному описанию класса растительности. Если расстояние именно до соответствующего класса составляло менее 6 м, отрицательный результат не учитывался.

Точность дешифрирования оценивалась по каждому из шести классов растительности раздельно и рассчитывалась как отношение числа совпадений по описаниям и дешифрированию к общему числу описаний по данному классу за вычетом предположительно смещённых точек (maбn. 2).

Класс	Количество наземных описаний	Совпадения по описаниям и по карте	Несовпадения	Несовпадения менее 5 м от правильного класса	Точность
Ельники	21	18	1	2	94,7
Елово- сосновые	12	7	2	3	77,8
Лиственные	30	22	2	6	91,7
Сосновые	19	12	2	5	85,7
Скальные	7	6	0	1	100
Луга	7	7	0	0	100

Таблица 2. Оценка точности дешифрирования (валидация)

Валидация показала, что при использованном методе дешифрирования наиболее точно дешифрируются еловые и лиственные леса, луга и скальные комплексы. Несколько ниже точность дешифрирования сосновых и промежуточных смешанных типов лесов. Ввод дополнительных дешифровочных признаков и, соответственно, ординационных осей позволяет повысить точность и детальность дешифрирования.

Заключение

Следует отметить довольно высокую предикативность ординационного классификационного дешифрирования по СВР с использованием морфолого-физиологических параметров при дешифрировании классов растительности, позволившего провести дешифрирование более чем с 80%-й точностью в ситуации высокой фрагментированности растительного покрова и при учёте только двух морфолого-физиологических параметров.

При этом выявляются некоторые проблемы использования снимков субметрового разрешения. Например, при дешифрировании растительности по СВР возникают проблемы

недостаточно точной геометрической коррекции предоставляемых снимков и неодинаковости угла наклона камеры при проведении съёмки. Это не позволяет проводить прецизионное сравнение разновременных снимков на пиксельном уровне и в полной мере использовать возможности дешифрирования по разновременной динамике (change detection) и текстурным особенностям поверхности растительного покрова.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00715а) и инициативного гранта СПбГУ 18.52.503.2015. Космические снимки получены по гранту от DigitalGlobe Foundation.

Литература

- 1. *Кашкин В. Б.*, *Сухинин А. И.* Распознавание образов // Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. С. 145–164.
- 2. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 424 с.
- 3. *Малышева Н. В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. 154 с.
- 4. *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.
- 5. *Шовенгердт Р.А.* Коррекция и калибровка // Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. С. 370—380.
- 6. *Фарбер С. К.*, *Кузьмик Н. С.*, *Брюханов Н. В.* Погрешности дешифрирования лесов приангарья методом классификации пикселей спутникового снимка // Сибирский лесной журн. 2016. № 4. С. 56—67.
- 7. *Kuester M. A.* Absolute Radiometric Calibration: 2016v0. DigitalGlobe, 2017. URL: https://dg-cms-up-loads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/209/ABSRADCAL_FLEET_2016v0_Rel20170606.pdf (Accessed 15.11.2017).
- 8. Eastman J. R. IDRISI Selva Tutorial: Manual Version 17.0. Clark University, 2012. 354 p.

Interpretation of vegetation of the northwest Ladoga region from high-resolution satellite imagery with the use of ordination on a complex of morphological and physiological features

A. N. Afonin, Yu. V. Sokolova, N. N. Bardakov, I. O. Saharov

Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia E-mail: a.afonin@spbu.ru

Interpretation of vegetation was implemented with the use of high resolution imagery from satellites QuickBird-2 (2.4 and 0.6 m), GeoEye-1 (2 and 0.5 m) and WorldView-2 (2 and 0.5 m). The following morphological and physiological characteristics of objects were used as indicators for interpretation: morphometric features of cover projection of vegetation (tree crown) on snow, estimated by reflection of vegetation in the early spring image, and integral index of photosynthetic activity of vegetation, estimated by NDVI from summer image. Conceptual and methodological aspects of direct expert interpretation of vegetation by methods of classification with the use of raster algebra are considered. Validation of interpretation results by field observations showed 70–100% precision of mapping different types of vegetation (6 classes for level of formations and groups of formation). Accounting more morphological and physiological characteristics allows to increase the accuracy of interpretation. However, some problems of using high resolution images of (<1 m) should be noted. For example, the problem of inaccurate geometric correction of high resolution images, provided for the research, and

different camera angles during acquisition of images. These factors do not allow to conduct precise comparison of multitemporal images and to use the abilities of change detection by texture features of vegetation cover on the pixel level. This raises generalization as the necessary step in interpretation of high resolution images by classification methods of raster algebra.

Keywords: interpretation, vegetation, remote sensing data, high resolution imagery, methods, interpretation indicators, morphological and physiological indicators, classification, GIS, raster algebra, generalization

Accepted: 20.11.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-147-156

References

- 1. Kashkin V.B., Sukhinin A.I., Raspoznavanie obrazov (Pattern recognition), In: *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* (Remote Sensing of the Earth. Digital processing of images), Moscow: Logos, 2001, pp. 145–164.
- 2. Lur'e I. K., Geoinformatsionnoe kartografirovanie. Metody geoinformatiki i tsifrovoi obrabotki kosmicheskikh snimkov (GIS mapping. Methods in geoinformatics and digital processing of satellite images), Moscow: KDU, 2008, 424 p.
- 3. Malysheva N.V., *Avtomatizirovannoe deshifrirovanie aerokosmicheskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii* (Automated interpretation of aerial and satellite images of woodland), Moscow: Izd. MGUL, 2012, 154 p.
- 4. Puzachenko M. Yu., Kotlov I. P., Chernen'kova T. V., Tekhnologicheskaya skhema monitoringa prirodnykh ob"ektov s ispol'zovaniem DDZ i GIS-tekhnologii (Technological scheme of natural objects monitoring, using remote sensing and GIS technologies), *Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii* (Biodiversity monitoring of Russian forests), Moscow: Nauka, 2008, pp. 347–359.
- 5. Schowengerdt R.A., Radiometricheskaya kalibrovka (Radiometric calibration), In: *Distantsionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenii* (Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing), Moscow: Tekhnosfera, 2010, pp. 370–380.
- 6. Farber S. K., Kuz'mik N. S., Bryukhanov N. V., Pogreshnosti deshifrirovaniya lesov priangar'ya metodom klassifikatsii pikselei sputnikovogo snimka (Errors in interpretation the forests of the Angara region by the method of classifying the pixels of a satellite image), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 4, pp. 56–67.
- 7. Kuester M.A., Absolute Radiometric Calibration: 2016v0, *DigitalGlobe*, 2017, URL: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/209/ABSRADCAL_FLEET_2016v0_Rel20170606.pdf (Accessed 15.11.17).
- 8. Eastman J. R., *IDRISI Selva Tutorial*, Manual Version 17.0, Clark University, January 2012, 322 p.