

УДК 502.53:581.55+528.8.04

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТУНДРОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ НА ПРИМЕРЕ ВОДООХРАННЫХ ЗОН РЕК НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА¹

© 2018 г. М.В. Козлова, Г.Ш. Турсунова, О.В. Горелиц, И.В. Землянов

*Государственный Океанографический Институт им. Н.Н. Зубова
Россия, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6. E-mail: gorelits@mail.ru*

В статье рассматриваются методы составления карт растительного покрова водоохранных зон рек северной части Ненецкого Автономного Округа (НАО) с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) и полевых данных. Показаны особенности обработки многоканальных и черно-белых спутниковых снимков высокого и среднего пространственного разрешения территории зоны тундр. Впервые с помощью ДДЗЗ для рассмотренных участков водоохранных зон на территории НАО составлены подробные карты растительного покрова и определены участки с антропогенно нарушенными фитоценозами.

Ключевые слова: растительный покров, водоохранная зона, дистанционное зондирование Земли, антропогенное воздействие, тундра.

DOI: 10.24411/2542-2006-2017-10005

Растительный покров – это один из ключевых компонентов экосистем и индикаторов состояния природной среды. На прибрежных территориях водных объектов в тундрах он сдерживает эрозионные процессы и деградацию вечной мерзлоты, в т.ч. вызванные хозяйственной деятельностью человека и русловыми процессами (Игловский, 2013; Самозарастание ..., 2014). В зонах арктического климата тундровые фитоценозы имеют очень низкую способность к восстановлению, поэтому невероятно важна их охрана.

Для снижения негативного воздействия деятельности человека на уязвимые фитоценозы Крайнего Севера необходимы рекогносцировочные обследования, картографирование и проведение мониторинга состояния растительного покрова, а также разработка специальных подходов при ведении и планировании хозяйственной деятельности в зоне распространения вечномерзлых пород (Отчет ..., 2001; Программа мониторинга ..., 2014).

Картографирование тундр методически – достаточно сложная задача, поэтому необходимо совместное применение методов, основанных на обработке ДДЗЗ, и методов полевых описаний. Возможности использования оптических спутниковых данных высокого разрешения в условиях тундр ограничены из-за облачности и короткого вегетационного периода, поэтому за сезон не удастся получить большого числа снимков, пригодных для анализа (Tutubalina, Rees, 2001; Тутубалина, 2006). Кроме того, стоимость ДДЗЗ высокого разрешения часто не позволяет получить временные ряды таких изображений. Поэтому для получения достоверных данных о состоянии земной поверхности необходимо комбинирование снимков высокого пространственного разрешения со свободно распространяемыми разновременными снимками среднего разрешения.

Цель данной работы – рекогносцировочное обследование растительных сообществ тундр с использованием оптических спутниковых данных разного пространственного разрешения, изучение состава и состояния растительных сообществ, а также степени и характера воздействия деятельности человека на фитоценозы тундр в пределах водоохранных зон

¹ Работа выполнена в рамках ГК № 3-0184200000615000110 от 04.06.2015 и ГК 7-0184200000616000154 от 03.08.2016.

водных объектов, расположенных в северной части Ненецкого автономного округа (НАО). Кроме того, были составлены карты распределения основных типов растительного покрова в пределах водоохранных зон (далее – ВЗ) в виде ГИС-проекта. Детальное обследование растительного покрова для исследуемых территорий ВЗ проведено впервые.

Материалы и методы

В соответствии со статьей 65 Водного кодекса РФ, водоохранными зонами являются территории, которые примыкают к береговой линии (границам водного объекта) морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ и на которых устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности в целях предотвращения загрязнения, засорения, заиления указанных водных объектов и истощения их вод, а также сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира (Водный кодекс ..., 2006).

Работы проводили в 2015 и 2016 годах в черте водоохранных зон водных объектов северной части НАО (зона тундры). Изучали участки ВЗ объектов в окрестностях поселков Амдерма и Каратайка и на территории лицензионного участка нефтяного месторождения имени Р. Требса к югу от пос. Варандей (рис. 1).



Рис. 1. Район исследований: 1 участок – окрестности пос. Амдерма: рр. Амдерма, Крестовая, Средняя, Амдерматане, Паймояха, оз. Большое Тоинто; 2 участок – лицензионный, окрестности месторождения им. Р. Требса: рр. Пярцор-яга, Варкнив-яга, Хараюнко, Няндангосё, Малая Сырапензя, р. Без названия; 3 участок – окрестности пос. Каратайка; р. Янгаре́й. **Fig. 1.** Study area: 1st site – Amderma settlement vicinage: Amderma, Krestovaya, Amdermatane, Paimoyakha rivers, Bolshoe Tointo Lake; 2nd site – license plot of oilfield named after R. Trebs: Pyartsor-yaga, Varkniv-yaga, Kharayunko, Nyandangosye, Malaya Syrapenzya rivers, unnamed river; 3rd site – Karataika settlement vicinage: Yangarey river.

Данные территории представляют собой как условно естественные местообитания, так и нарушенные участки (месторождения, поселения, пастбища). Были обследованы ВЗ 13 водных объектов. Также использованы данные полевых работ: географически привязанные геоботанические описания профилей и площадок как фоновых, так и поврежденных участков вблизи антропогенных объектов в черте ВЗ. Всего описано 1187 опорных точек (из них выполнено 235 описаний растительности: первый участок – 452 точки, второй – 693, третий – 21 (номера участков и название водных объектов даны на рисунке 1). При составлении геоботанических описаний растительных сообществ для верификации ДДЗЗ основное внимание уделили таким характеристикам растительного покрова, которые могут оказывать влияние на его спектральные характеристики (тип сообщества, список видов, фенологические фазы доминантов и субдоминантов, проективное покрытие доминантов и субдоминантов (занимающих более 5% проективного покрытия), аспекты, присутствие повреждений растительного покрова с указанием возможных причин). Также составили описания местоположений тестовых площадок на местности (дополнительно к координатам). При классификации растительных сообществ за основу приняли доминантную классификацию (Миркин, Наумова, 2012, 2014).

В работе использованы материалы аэрофотосъемки, осуществленной с борта вертолета фотокамерами Canon 500D и Canon 5D Mark II, и спутниковые данные разного пространственного разрешения. Снимки высокого разрешения (0.5-2 м/пкс) получены аппаратами WorldView-1, сканер WV60 (черно-белый, видимый диапазон $\lambda=0.45\div0.9$ нм) на территории окрестностей пос. Амдерма и Каратайка; и аппаратом WorldView-2, сканер WV2 (черно-белый, $\lambda=0.45\div0.8$ нм); многоканальный, 8 каналов – видимый-ближний инфракрасный диапазон ($\lambda=0.4\div1.04$ нм), на территории окрестностей месторождения им. Р. Требса. Также использовали данные свободного доступа среднего пространственного разрешения. Провели анализ данных аппарата Sentinel-2A, сканер MSI (многоканальный, 13 каналов: видимый – коротковолновый инфракрасный диапазон, $\lambda=0.4\div2.3$ нм, пространственное разрешение 10, 20 м), полученные с сайта Европейского Космического Агентства (2017), и данных аппарата Landsat 8, сканер OLI (черно-белый, $\lambda=0.5\div0.7$ нм; многоканальный, 8 каналов – видимый и коротковолновый ИК диапазон, $\lambda=0.4\div2.3$ нм, разрешение 15, 30 м), полученных с сайта Геологической службы США (2017). ДДЗЗ высокого разрешения относятся к периодам проведения полевых работ (конец августа, сентябрь и начало октября), а часть изображений аппарата World-View-1 – к началу июня. ДДЗЗ среднего разрешения относятся к различным датам вегетационного сезона 2015 и 2016 гг.

На основе полевых данных, данных аэрофотосъемки и оптических спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения выполнили анализ и картографирование растительного покрова ВЗ. Для составления карт провели автоматическую классификацию спутниковых многоканальных изображений различными методами.

Ввиду того что общая площадь ВЗ достаточно существенна, мы применили автоматизированные методы обработки ДДЗЗ. Использовали метод автоматической классификации с обучением (Congalton, 1991; Plourde, Congalton, 2003; Remote Sensing ..., 2006) в программе ArcGis 10.2. Кроме того, применили метод автоматической классификации спутниковых снимков по тематическим индексам арифметики каналов для многоканальных снимков и комбинирование черно-белых спутниковых изображений с многоканальными данными среднего пространственного разрешения. Использовали следующие индексы: нормализованный разностный водный индекс MNDWI, вегетационные индексы – нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и взвешенный разностный вегетационный индекс WdVI, нормализованный разностный индекс застройки NDBI (рис. 2).

Расчет водного индекса MNDWI производится по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{GR} - \text{SWIR}) / (\text{GR} + \text{SWIR}) \quad (1),$$

где GR – спектральная яркость в диапазоне длин волн 510-600 нм (зеленый диапазон), SWIR – спектральная яркость в диапазоне 1500-1600 нм (коротковолновый инфракрасный диапазон).

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI рассчитывается по формуле:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (2),$$

где NIR – спектральная яркость в диапазоне 760-900 нм (ближний инфракрасный диапазон), RED – спектральная яркость в диапазоне 640-700 нм (красный диапазон).

Взвешенный разностный вегетационный индекс WdVI рассчитывается по формуле:

$$\text{WdVI} = \text{NIR} - g \cdot \text{RED} \quad (3),$$

где g – угловой коэффициент почвенной линии в координатной плоскости (NIR; RED).

Индекс застройки NDBI рассчитывается по формуле:

$$\text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR}) \quad (4).$$

Индексы NDVI и NDBI применяли для анализа влияния деятельности человека на экосистемы ВЗ.



Рис. 2. Общая схема обработки ДДЗЗ. Fig. 2. Flowchart of remotely sensed data processing.

Классификацию полученных карт индексов проводили пороговым методом. Пороговые значения индексов определяли на основе данных полевых подспутниковых обследований. После проведения классификации снимков среднего разрешения выбирали те классы, которые имели низкую точность выделения на снимках высокого разрешения, и из серии классифицированных изображений среднего разрешения (летний период) выбирали те, где эти классы определялись с более высокой точностью, и проводили комбинирование с классами, выделенными по ДДЗЗ высокого разрешения (рис. 3).

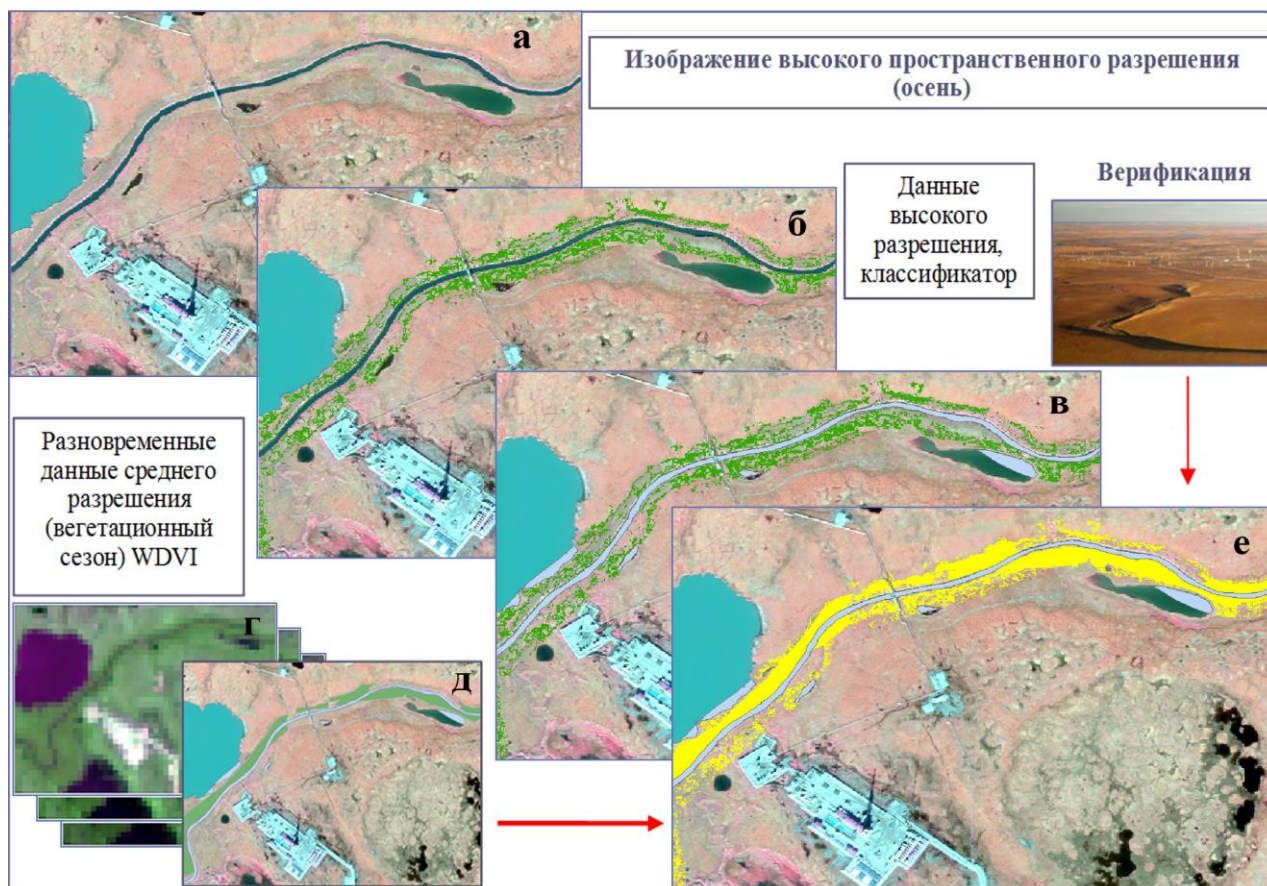


Рис. 3. Пример создания карт распространения сообществ *Betula nana* на базе комбинации спутниковых данных высокого и среднего пространственного разрешения на участке ВЗ р. Хараюнко, где была получена высокая ошибка упущения при классификации снимка высокого разрешения: а – исходный снимок высокого разрешения, б – выделение сообществ *Betula nana* в черте ВЗ (классификатор, снимок высокого разрешения), в – добавление маски водных объектов (на базе индекса MNDWI), г – выделение сообществ *Betula nana* на разновременных летних снимках среднего разрешения на базе индекса WDWI, д – наложение наиболее точно классифицированного слоя на снимок высокого разрешения, е – совмещение слоев на базе обоих снимков и верификация окончательного результата. **Fig. 3.** Example of the map creation algorithm for *Betula nana* communities, made on the basis of combined satellite data of high and medium spatial resolution (water protection zone (WPZ) of the Harayunko River, in which a high omission error was produced by the high-resolution image classification): а – original high-resolution image, б – delineation of *Betula nana* communities in the WPZ (classifier, high resolution image) – addition of a water body mask (based on the MNDWI index), г – delineation of *Betula nana* communities in summer multi-temporal medium resolution imagery on the basis of the WDWI index, д – overlaying of the most precisely classified medium resolution layer on the high-resolution image, е – combination of layers created on the basis of both images and validation of the final result.

Результаты и обсуждение

1. Полевые данные о растительном покрове. Преобладающие фитоценозы

Полевые данные показали, что растительный покров долин рек в пределах обследованных участков ВЗ имеет много общих черт.

Коренные (условно ненарушенные или слабо нарушенные) фитоценозы обследованных

территорий представлены большей частью типичными сообществами арктических тундр, среди которых мы выделили несколько основных типов. **Кустарниковые ивняки** (в основном *Salix phylicifolia* L., *S. glauca* L., *S. lanata* L., *S. lapponum* L.) по высоте в некоторых районах достигали 1.8 м. **Ерники** (сообщества *Betula nana* L., которые также изредка могут включать небольшие участки с моховым покровом и кустарничками в нижних ярусах) на некоторых участках имели высоту от 15 см. **Низкие травяно-моховые ивняки** (включают б.ч. кустарники до 50 см высотой и стланики *Salix pulchra* Cham., *S. glauca* L., *S. Myrtilloides* L., *S. myrtilis*, *S. myrsinites*, *S. arctica* Pall., *S. polaris* Wahlenb.) с различными видами мхов в нижнем ярусе. **Сфагново-травяно-кустарничковые:** *Salix nummularia* Andersson, *S. reticulata* L., *Vaccinum uliginosum*, *V. vitis-idaea*, *Empetrum* sp., *Arctous alpina* (L.) Nied.; местами – *Andromeda polifolia* L., *Ledum decumbens* (Aiton) Lodd. ex Steud. **Сфагновые:** сообщества *Sphagnum* spp., где наиболее массовыми, как правило, являются виды *S. fuscum* (Schimp.) H. Klinggr., *S. balticum*, *S. Capillifolium* (Ehrh.) Hedw., *S. russowii* Warnst. **Зеленомошные, злаково-осоковые:** наиболее массовые среди злаков – представители *Festuca* spp., *Poa* spp., *Alopecurus alpinus* L., местами – *Avenella flexuosa* (L.) Drejer; среди осок – *Carex arctisibirica* (Jurtzev) Czerep., *C. rotundata* Wahlenb. *C. rariflora* (Wahlenb.) Sm. Состав зеленых мхов, как правило, чрезвычайно разнообразен. Чаще других были отмечены *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Polytrichum* spp., *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Drepanocladus s.l.*, *Calliergon* sp., *Pogonatum* sp., *Aulacomnium* spp. **Разнотравно-осоково-моховые** с преобладанием *Rubus chamaemorus* L., *Comarum palustre* L., *Polemonium* sp., *Equisetum palustre* L., *Dryas* sp., *Carex arctisibirica*, *C. rotundata*, *C. rariflora*. **Осоковые** могли включать как представителей семейства: *Eriophorum angustifolia* Hoppe, *E. scheuchzeri* Hoppe, *Carex arctisibirica*, *C. aquatilis* Wahlenb., *Carex cespitosa* L., *Trichophorum cespitosum* (L.) Hartm., *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla и др., так и ежеголовниковых (представители *Sparganium*) и ситниковых (*Juncus atrofusus* Rupr.). **Нефроново-кустарничковые:** листоватые лишайники с преобладанием *Nephroma arcticum* (L.) Torss., кустарнички – преимущественно *Vaccinum uliginosum*, *V. vitis-idaea*. **Кладониево-цетрариевые с кустарничками:** преобладают различные представители родов *Cladonia*, чаще – *C. rangiferina* (L.) Weber ex F.H. Wigg., *C. stellaris* (Opiz) Pouzar & Vězda. **Ежеголовниковые** (преимущественно представители рода *Sparganium*) занимают, как правило, небольшие околородные участки и мелководья.

Сообщества с участием сфагновых мхов отмечены преимущественно в черте ВЗ рек окрестностей месторождения им. Р. Требса, тогда как фитоценозы, в состав которых входят зеленые мхи, более характерны для остальных обследованных территорий.

В районе исследования речные долины с пологими бортами, как правило, были заняты низкими ивняками, *ивково-травяно-моховыми*, реже *ерниками* (*с зелеными или сфагновыми мхами в нижнем ярусе*), у воды отмечены большей частью *осоковые* фитоценозы, у верхней части – *кустарничково-лишайниковые*. Для долин с крутыми бортами и скальными выходами характерны разнотравно-осоково-моховые фитоценозы *с кустарниками в понижениях, мхи в основном зеленые, реже сфагновые*, низкие ивняки, кустарниковые ивняки, ерники. *Марши* (периодически затопливаемые морем территории) отмечены в пределах обследованных ВЗ в северной части участка 2 – окрестности месторождения им. Р. Требса (северная часть ВЗ р. Пярцор-Яга, где ее долина выполаживается, ВЗ р. Няндангосё, приустьевая часть ВЗ р. Хараюнко, что согласуется с литературными данными (Лавриненко, 2012). Здесь отмечены в основном *сфагновые или сфагново-травяно-кустарничковые* фитоценозы. Нефроново-кустарничковые сообщества приурочены в основном к участкам с мелкобугристым рельефом.

Состав фитоценозов, *нарушенных* в результате естественных русловых и эрозионных процессов или антропогенного воздействия, существенно отличался от состава коренных фитоценозов, а разнообразие типов нарушенных фитоценозов было существенно ниже.

Отмечены **гравилатовые** (*Geum rivale*), осоково-дягилевые (крупные осоки – в основном *Carex aquatilis*, *C. cespitosa*, *Archangelica officinalis*), **осоково-чемерицевые** (*Carex arctisibirica*, *C. cespitosa*, *Veratrum lobelianum*), **вейниковые** (преимущественно *Calamagrostis neglecta*), **осоково-дягилевые** (*C. cespitosa*, *Archangelica officinalis* Hoffm.), **пушицевые** (*Eriophorum scheuchzeri*), **злаково-разнотравные** (как правило, с доминированием *Alopecurus alpinus* Sm., *Festuca rubra* L., видов *Poa*, *Achillea millefolium*). Гравилатовые, осоково-дягилевые сообщества б.ч. приурочены к участкам, где отмечено проявление естественных эрозионных процессов (стенки отрыва, побочни и другие территории, освободившиеся от растительности естественным образом). Остальные типы фитоценозов отмечены преимущественно на территориях, подверженных в прошлом воздействию человека, причем первые три типа растительных сообществ приурочены к более сухим участкам, чем прочие, и реже приурочены к рудеральным местообитаниям естественного происхождения.

Было также установлено, что коренные сообщества обследованных территорий составляют преимущественно виды стресс-толеранты по классификации Дж.Ф. Грайма (Grime, 1977). Из 142 массовых видов (по обилию, занимающих более 5% проективного покрытия) 132 вида или 93% можно отнести к типичным стресс-толерантам, а остальные 7% – к промежуточной группе конкурентов-рудералов, т.е. видам, достаточно массово заселяющим нарушенные местообитания в процессе восстановительной сукцессии, но редким в климаксных коренных тундровых фитоценозах. Ареал таких видов далеко выходит за пределы зоны арктических тундр.

2. Автоматическая классификация с обучением многоканальных изображений высокого пространственного разрешения окрестностей месторождения им. Р. Требса (данные аппарата WorldView-2)

Классификация с обучением многоканальных снимков высокого разрешения позволила получить важную информацию о распределении большинства характерных для района исследования растительных сообществ в черте обследованных ВЗ в окрестностях месторождения им. Р. Требса (рис. 4). Полученные при анализе спутниковых снимков классы растительности достаточно хорошо совпадали с теми, что были выделены при полевых работах. Общая точность классификации по обследованным ВЗ варьировала в пределах от 79.5% до 84.4%. По ряду отдельных классов была получена также достаточно высокая точность (табл. 1). В то же время точность определения некоторых классов оказалась достаточно низкой. Так, при классификации использованных снимков была велика ошибка упущения для кустарников, и особенно для ивняков. Для ерников же дополнительно могла наблюдаться обратная тенденция (увеличение ошибок переоценки).

Низкая точность выделения, полученная для класса кустарниковых ив, объясняется тем, что осенью значительная их часть имела сухие, опавшие или пожелтевшие листья. Ерники в некоторых местах также закончили вегетацию. Помимо этого при проведении обследований в поле были обнаружены и участки с очень низкими ерниками (15-20 см высотой), которые постепенно сменяются другими типами фитоценозов, например, мохово-стланиковыми или лишайниково-кустарничковыми сообществами. Такие ерники часто встречаются в наиболее северных частях района исследований, о чем говорят полевые данные. Они плохо отличались на осенних снимках от кустарничково-моховых сообществ (ивково-моховых, голубичных, или арктоусовых сообществ), локализованных на бровках и бортах долин, так как растения к моменту проведения работ имели б.ч. листву в осенней окраске, как и *Betula nana*.



Рис. 4. Карта растительности участка ВЗ р. Паймоякха, ВЗ р. Няндангосё и окрестностей, полученная на базе автоматической классификации с обучением многоканального снимка WorldView-2. **Fig. 4.** Plant cover map of the Paimoyakha River WPZ, Nyandangosyo River WPZ, and the surrounding area, created by automatic supervised classification of multispectral WorldView-2 image.

Изменение цвета листвы и снижение активности фотосинтеза при переходе к периоду зимнего покоя снижает возможности классификации и ведет как к увеличению ошибок упущения, так и переоценки (Зимин и др., 2014). Помимо этого при классификации возникали проблемы с выделением других классов растительности (точность 60-70%): низких ивняков, осоково-мохово-разнотравных и мохово-злаково-осоковых сообществ (табл. 1). Несмотря на то что последний тип сообществ широко распространен на всей территории исследования, у таких сообществ затруднительно определить четкие границы даже в поле, особенно в осенний период, когда ряд доминирующих видов переходит к состоянию зимнего покоя или оканчивает вегетацию. Например, злаки и многие мелкие осоки уже почти не вегетируют, поэтому сообщества с их участием не всегда возможно отличить при автоматической классификации снимков от других сообществ с участием зеленых или белых мхов. На участках с выраженным рельефом точность классификации могла также падать из-за густых теней на бортах речных долин и оврагов с V-образным профилем.

Как видно на примере данных из таблицы 1, наиболее высокая точность выделения получена для водных объектов и участков без растительности. Однако сфагновые сообщества также выделяются с достаточно высокой точностью, а на некоторых участках и осоковые (гидрофильные) фитоценозы, поскольку даже в сентябре они достаточно активно

вегетируют, что в целом типично для гигрофитов (Козлова, 2010). Довольно высокая точность выделения была получена также для сообществ наиболее сухих местообитаний в пределах ВЗ (бровок речных долин), где отмечены преимущественно лишайниково-кустарничковые сообщества, особенно те, в которых значительную долю составляют вечнозеленые кустарнички *Empetrum* sp., *Ledum decumbens*, *Vaccinium vitis-idaea*, а не листопадные, такие, как *Arctous alpina* и/или *Vaccinium uliginosum*.

Таблица 1. Точность автоматической классификации многоканального снимка аппарата WorldView-2 на участке ВЗ р. Пярпор-яга. **Table 1.** The accuracy of the automatic WorldView-2 multispectral image classification. WPZ of the Pyartsor-yaga river.

Типы фитоценозов	Точность пользователя, %	Точность классификатора, %
Кустарниковые ивняки	71.4	52.6
Ерники	68.2	78.9
Низкие травяно-моховые ивняки	70.4	76.0
Сфагново-травяно-кустарничковые	77.8	70.0
Сфагновые	95.8	95.8
Разнотравно-мохово-осоковые	70.6	92.3
Мохово-злаково-осоковые	63.6	70.0
Лишайниково-кустарничковые	90.9	71.4
Сообщества представителей сем. осоковых	69.2	81.8
Участки, лишённые растительности	96.9	91.2
Вода	96.3	96.4
Общая точность	82.2	

По полученным результатам можно заключить, что снижение точности классификации некоторых типов растительных сообществ происходит потому, что их доминирующие виды переходят (или перешли) к состоянию зимнего покоя и, таким образом, утратили специфику своей отражательной способности. Поэтому осенние снимки могут быть использованы для уверенного выделения лишь отдельных типов фитоценозов в тундрах ВЗ рек НАО.

Точность выделения открытой воды на осенних снимках была достаточно высока, т.к. береговые линии ряда водных объектов в этот период меньше маскируются гигрофитной растительностью, чем летом. Причем точность выделения удавалось повысить за счет использования индекса MNDWI, который селективно увеличивает контраст между открытой водной поверхностью и прочими объектами и успешно применяется в мировой практике (Ху, 2006; Zhang et al., 2012; Gautam et al., 2015). Например, для обсуждаемого участка точность повысилась до 98.7% (точность пользователя) и 98.2% (точность классификатора).

3. Применение многоканальных снимков среднего пространственного разрешения для улучшения результатов автоматической классификации растительного покрова

Чтобы улучшить качество автоматической классификации, мы использовали ряды спутниковых оптических изображений среднего пространственного разрешения, относящихся к различным датам вегетационного сезона 2015 и 2016 гг. В первую очередь эти данные мы применили к тем классам, для которых по снимкам аппарата WorldView-2 получили низкую точность классификации (70% и ниже) за счет осеннего снижения

активности вегетации доминирующих видов. Точность при выделении каждого класса различалась в зависимости от времени получения снимка. Помимо автоматической классификации с обучением для выделения некоторых растительных сообществ, например, кустарниковых ив, использовали индекс WDV, который в ряде случаев давал наилучшие показатели точности (табл. 2). WDV является чувствительным индексом, использующим почвенные линии. Он активно применяется рядом исследователей для разделения разных типов растительного покрова по многоканальным оптическим снимкам (Clevers, 1991; Srinivas et al., 2004).

Комбинация результатов автоматической классификации спутниковых снимков высокого и среднего пространственного разрешения дала хороший результат. Это позволило заполнить существенную часть пробелов в данных высокого пространственного разрешения, возникших при использовании снимков, выполненных в конце вегетационного периода, когда на кустарниках облетела листва, и элиминировать значительную часть ошибочно классифицированных пикселей (табл. 2).

Таблица 2. Максимальная точность классификации по ДДЗ среднего разрешения для классов, для которых получена низкая точность выделения по осеннему снимку высокого разрешения для ВЗ р. Пярцор-яга. **Table 2.** Maximum classification accuracy calculated in the medium resolution satellite images in the classes for which low classification accuracy was received in autumn high resolution image. The Pyartsor-yaga River WPZ.

Типы фитоценозов	Дата снимка	Метод	Точность пользователя, %	Точность классификатора, %
Кустарниковые ивняки	05 июля 2016	WDV	80.1	82.3
Ерники	17 сентября 2015	WDV	85.2	83.4
Низкие ивняки	15 августа 2016	Классиф.	79.1	79.5
Сфагново-травяно-кустарничковые	05 июля 2016	Классиф.	87.0	86.7
Мохово-злаково-осоковые	30 июля 2016	WDV	91.2	93.3

4. Комбинация многоканальных снимков среднего пространственного разрешения и черно-белых спутниковых изображений для картографирования ВЗ водных объектов окрестностей поселков Амдерма и Каратайка

Для ВЗ рек в окрестностях пос. Амдерма и Каратайка пришлось применять только многоканальные ДДЗ среднего пространственного разрешения, а имеющиеся черно-белые снимки высокого разрешения использовать как дополнительные данные для верификации снимков среднего разрешения вместе с полевыми данными. Полученная точность автоматической классификации была несколько ниже, чем при совместном использовании многоканальных снимков разного пространственного разрешения (табл. 3), и составила от 86.1 до 93.4% (точность пользователя и точность классификатора).

В результате проведенные работы показали, что, хотя верификация данных о характере растительного покрова по черно-белым изображениям можно проводить без многоканальных ДДЗ высокого разрешения, изображения начала лета и осеннего периода

позволяют достоверно идентифицировать лишь кустарниковые фитоценозы, в то время как основное разнообразие фитоценозов сосредоточено в других типах сообществ.

Таблица 3. Точность автоматической классификации снимка, полученного аппаратом Sentinel-2A участка ВЗ р. Янгарей 6 августа 2016 г. **Table 3.** The accuracy of automatic classification of the Sentinel-2A image acquired on 06 August, 2016. WPZ of the Yangarey river.

Типы фитоценозов	Точность пользователя, %	Точность классификатора, %
Кустарниковые ивняки	81.3	82.2
Ерники	88.2	77.8
Низкие травяно-моховые ивняки	77.5	80.3
Сфагново-травяно-кустарничковые	72.7	80.3
Сфагновые	96.3	94.7
Разнотравно-мохово-осоковые	73.5	82.4
Мохово-злаково-осоковые	79.8	72.2
Лишайниково-кустарничковые	91.8	80.4
Сообщества представителей сем. осоковых	83.2	92.6
Участки, лишенные растительности	96.1	94.2
Вода	97.1	95.3
Общая точность	90.1	

Используя автоматическую классификацию многоканальных снимков среднего разрешения, нам удалось оценить площадь кустарниковых сообществ (табл. 4). Особенно низкая площадь кустарников отмечена в ВЗ рек окрестностей пос. Амдерма, где кустарниковые сообщества отмечены большей частью по ложбинам и оврагам, что подтверждено и полевыми данными (рис. 5).

Было показано, что в черте ВЗ рек, которые в пределах обследованных территорий протекают в меридиональном направлении (с юга на север), отмечено большее разнообразие растительных сообществ, а в большинстве долин рек, протекающих в широтном направлении, разнообразие меньше, но больше доля кустарниковых сообществ. Кустарники часто растут в понижениях рельефа бортах долин, оврагов, склонах ортогональных ложбин, ассоциированных с буграми пучения и пр. Все указанное выше согласуется с полевыми данными и данными аэрофотосъемки (рис. 5). Высокие (до 18 м) кустарниковые ивняки присутствовали в основном в наиболее южных частях исследованного района. Для наиболее северных районов ВЗ водных объектов окрестностей месторождения им. Р. Требса, а также окрестностей пос. Каратайка, характерны преимущественно низкие кустарники (обычно ерники) или стланики и кустарнички, погруженные в моховый покров. В черте ВЗ водных объектов в окрестностях пос. Амдерма была отмечена особенно низкая площадь кустарниковых сообществ по сравнению с другими районами исследования.

5. Картографирование участков с нарушенным растительным покровом при помощи ДДЗЗ

ДДЗЗ разного разрешения позволяют фиксировать нарушения растительного покрова и оценить антропогенный вклад в эти нарушения. Автоматическая классификация спутниковых снимков дает возможность выявить участки со сниженной активностью вегетации и участки, лишенные растительного покрова (рис. 6).

Таблица 4. Площади кустарниковых сообществ в черте обследованных ВЗ, полученные по результатам обработки многоканальных и черно-белых ДДЗЗ разного пространственного разрешения. **Table 4.** Shrub community areas in the WPZs under study, calculated on the basis of the multispectral and panchromatic satellite imagery of different spatial resolution.

Водный объект, параметр водоохранной зоны	Кустарниковая растительность	Прочее	Водный объект, параметр водоохранной зоны	Кустарниковая растительность	Прочее
	S, км ² (S, %)	S, км ² (S, %)		S, км ² (S, %)	S, км ² (S, %)
р. Амдерматане, 50 м	0.0054 (2.18)	0.2412 (97.36)	р. Пяцор-Яга, 200 м	1.447 (12.96)	11.1677 (76.31)
р. Паймояха (Паймо-Яга), 100 м	0.0297 (1.78)	1.5561 (93.16)	р. Няндагосё, 100 м	0.0485 (2.10)	2.31 (85.24)
р. Крестовая, 100 м	0.0045 (0.34)	1.3076 (99.66)	р. Варкнив-Яга, 100 м	0.5156 (27.8)	1.1422 (61.61)
р. Средняя, 50 м	0	0.1665 (95.49)	р. Малая Сырапензя	0.1186 (16.49)	0.7193 (84.32)
р. Амдерма, 100 м	0.009 (0.35)	0.2412 (98.98)	р. Без Названия, 50 м	0.0497 (13.45)	0.3696 (86.51)
оз. Большое Тоинто, 50 м	0.0288 (1.5)	1.886 (98.5)	р. Хараюнка, 100 м	0.1882 (31.57)	0.3239 (54.35)
р. Янгарей, 200 м	0.18 (7.25)	2.4048 (96.84)			

Совместное использование тематических индексов (выявляющих постройки, растительность или участки открытой водной поверхности) позволяет анализировать причины сниженной активности вегетации. За счет дополнительного применения индекса MNDWI на обследованных территориях оказалось возможным идентифицировать не только водные объекты, но также затопленные и подтопленные участки вблизи хозяйственных объектов, часто обнаруживаемые при полевых обследованиях, и нередко занимаемые осоковыми фитоценозами (рис. 7). Применение индекса NDVI также позволяет выявить сильно поврежденные фитоценозы, участки без растительности, но дает более высокий контраст между активно вегетирующими участками и всеми остальными, чем классификация с обучением (Lumbuenamo, 1990), поэтому NDVI может быть использован для оценки степени повреждений фитоценозов, (Tutubalina, Rees, 2001). В нашей работе наибольший контраст между нарушенными и ненарушенными участками давал индекс NDVI, рассчитанный по летним снимкам аппарата Sentinel-2A по всему исследованному району (рис. 8). По низким значениям NDVI удавалось идентифицировать повреждение растительности за счет многократного проезда гусеничного транспорта по тундре, затопления и подтопления территорий вдоль многих хозяйственных объектов, а также осоковые фитоценозы, приуроченные к таким переувлажненным участкам.

Для анализа характера распределения этих участков по снимкам разного разрешения были выделены хозяйственные объекты. Для черно-белых снимков было проведено выделение хозяйственных объектов по участкам с максимальной яркостью пороговым методом, а для многоканальных снимков рассчитан нормализованный индекс застройки

NDBI. Несмотря на то, что часто индекс NDBI дает относительно невысокую точность классификации, он позволяет, среди прочих, выделять пиксели, соответствующие различным объектам антропогенного происхождения за счет использования коротковолновых инфракрасных каналов (Basso et al., 2004; Xu, 2007; Li, Liu, 2008; He et al., 2010), тогда как применение классификации с обучением многоканальных снимков в подобных случаях не давала достоверного результата. Благодаря расчетам NDBI, удалось выявить трубопроводы, кусты скважин, жилую застройку, дороги с покрытием и другие постройки (рис. 8).

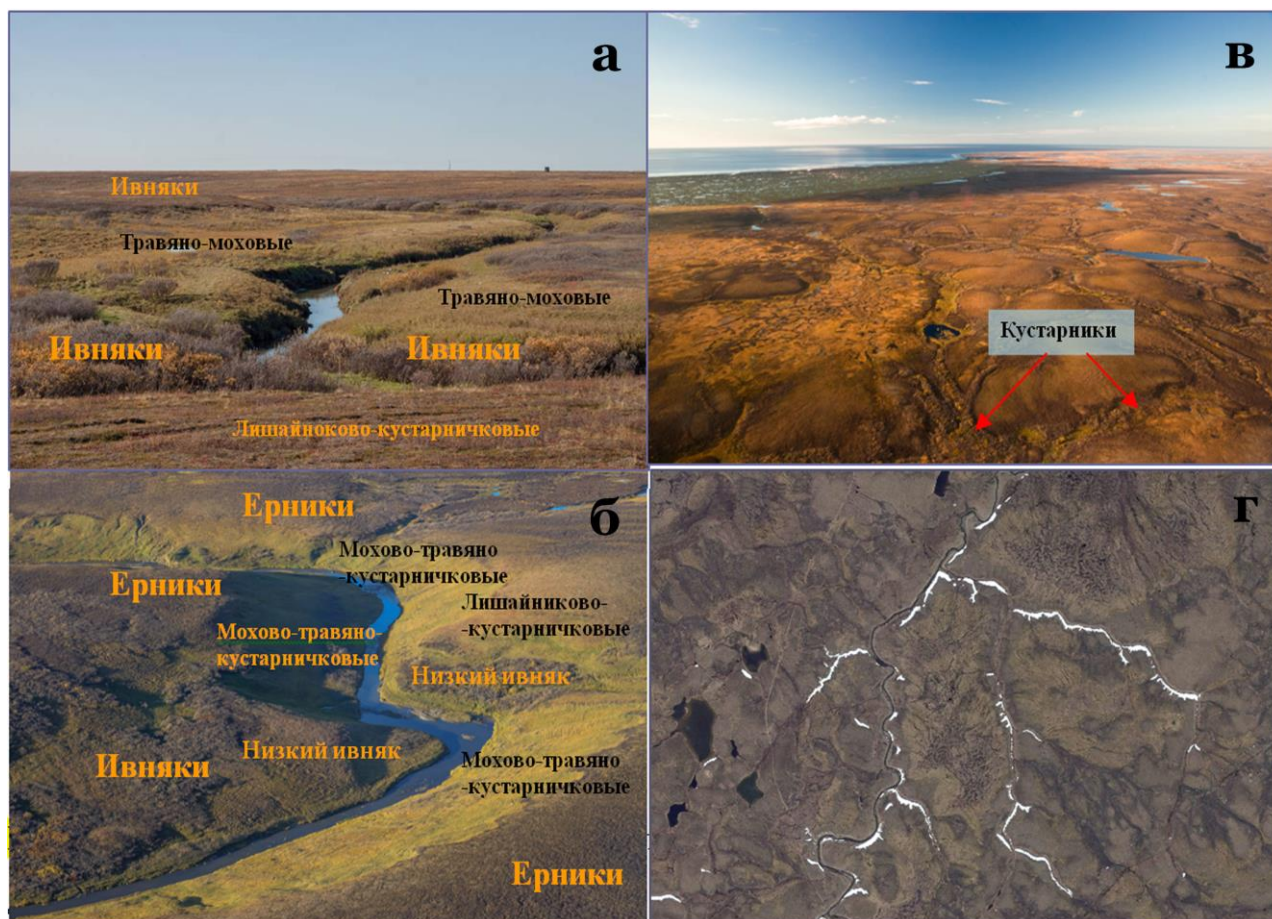


Рис. 5. Пространственное распределение растительных сообществ по полевым данным и данным аэрофотосъемки, и его связь с распределением наиболее длительно сохраняющегося снежного покрова: а – плоская долина с пологими бортами; б – V-образная долина; в – долина, расположенная по соседству с буграми пучения и кустарники, растущие в ложбинах и на бортах долины; г – распределение снежного покрова в весенний период. **Fig. 5.** In-situ spatial distribution of plant communities based on the field data and the aerial photography, and its relationship with the distribution of the most long-standing snow cover: а – flat valley with gently sloping sides, б – V-shaped valley, в – valley adjacent to the hydro-laccoliths, the shrubs growing in the gullies and on the sides of the valley; г – distribution of snow cover in the spring.

Было показано, что для обследованных территорий даже ДДЗЗ среднего разрешения позволяют выявить объекты антропогенного происхождения с точностью до 70-85% для разных участков. Наиболее высокая точность выделения по NDBI получена для снимков Sentinel-2A, как и по индексу NDVI. Очевидно причина в том, что пространственное разрешение этих снимков, с одной стороны, позволяет различать отдельные объекты, а с

другой стороны, тени оказывают меньше влияние на яркость отдельных пикселей одного и того же объекта и, следовательно, на точность определения. Пример участка финальной карты, полученной с применением различных тематических индексов, приведен на рисунке 9.

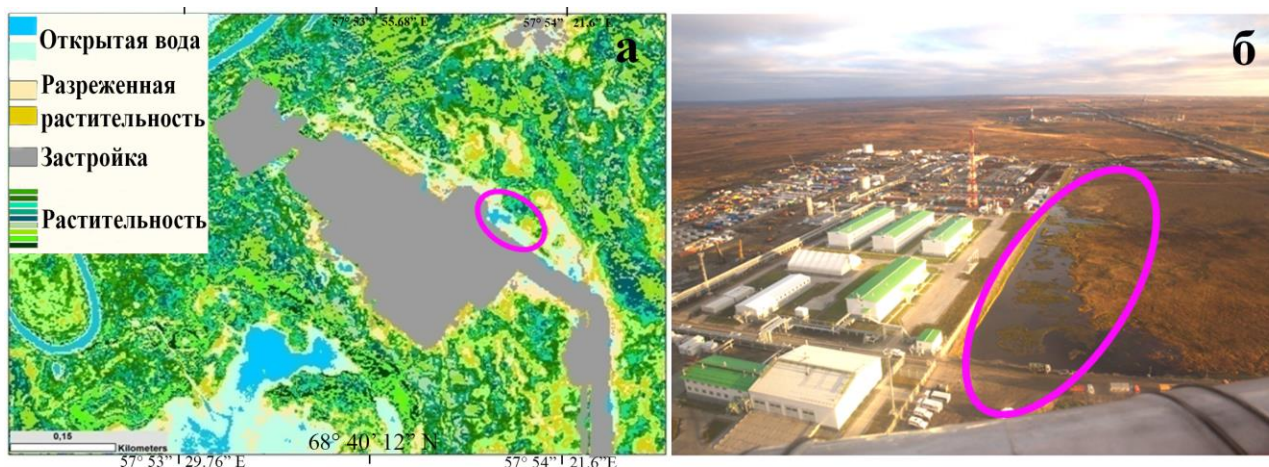


Рис. 6. Затопление и подтопление территорий (обведено), примыкающих к хозяйственным объектам, и нарушение растительного покрова вблизи них: а – результат автоматической классификации снимка WorldView-2, б – аэрофотосъемка. **Fig. 6.** Inundated and under-flooded areas (circled), adjacent to the build-up, and damaged plant cover near them. а – result of the automatic classification of the WorldView-2 image, б – aerial photography.



Рис. 7. Осоковые фитоценозы (сообщества *Eriophorum scheuchzeri*) на подтопленных территориях, примыкающих к хозяйственным объектам (стрелки): а, б – разные степени зарастания заболоченных участков у трубопроводов; в – осоковые сообщества у обочины дороги с покрытием; г – плодоносящие растения. **Fig. 7.** Sedge phytocenoses (communities of *Eriophorum scheuchzeri*), in the damaged, under-flooded areas adjacent to the economic objects (arrows): а, б – different degrees of the overmoistened area overgrowth near the pipelines; в – sedge community on the roadside; г – fruiting plants.

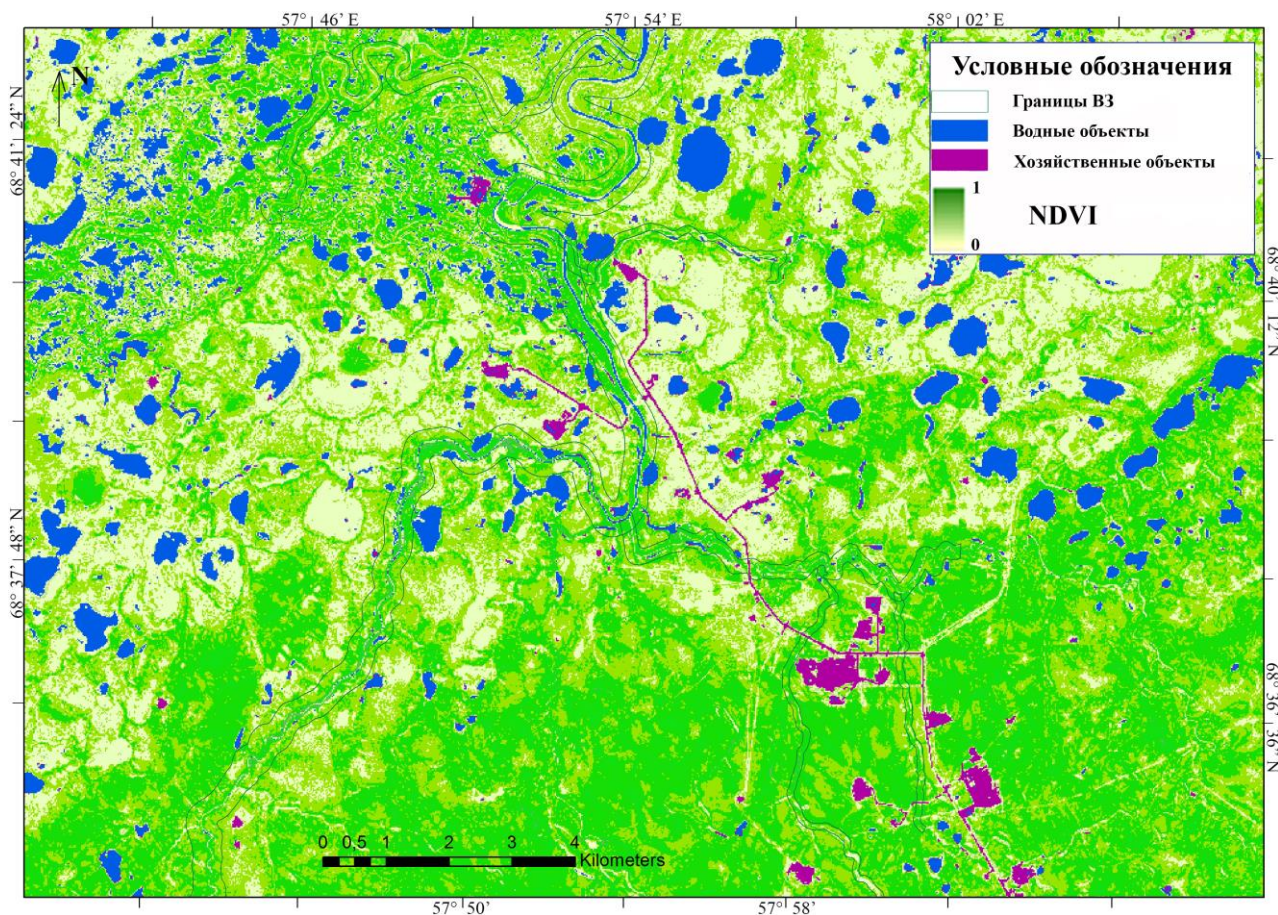


Рис. 8. Выделенные на базе тематических индексов (по NDBI – хозяйственные объекты, по NDVI – растительность и ее состояние, по MNDWI – водные объекты) различные типы земной поверхности на снимке Sentinel-2A (08 августа 2016 г.). **Fig. 8.** Different types land cover selected on the basis of the thematic indices (economic objects (based on NDBI); vegetation and its condition (based on NDVI); water bodies (based on MNDWI)), Data source – Sentinel-2A image acquired on 06 August, 2016.

Черно-белые снимки оказались малопригодны для выявления антропогенных объектов, так как скальные выходы в этом случае существенно снижают точность автоматической классификации, создавая высокий уровень шума. Но даже после удаления шума, удавалось достичь точности классификации лишь около 70% на наиболее равнинных участках (табл. 5).

Итак, проведенный анализ ДДЗЗ показал, что на исследуемой территории в пределах ВЗ можно с достаточно высокой долей детализации автоматизированным способом идентифицировать различные растительные сообщества, выделять открытые водные поверхности и выявлять нарушенные (в т.ч. антропогенно) участки.

Выводы

ДДЗЗ являются необходимым инструментом для мониторинга таких труднодоступных и обширных территорий, как обследованные ВЗ на территории НАО. Однако для таких территорий, как зона тундр, трудно получить безоблачные оптические снимки из-за особенностей климата, являющихся также причиной короткого активного вегетационного периода, продолжающегося от одного до полутора месяцев.

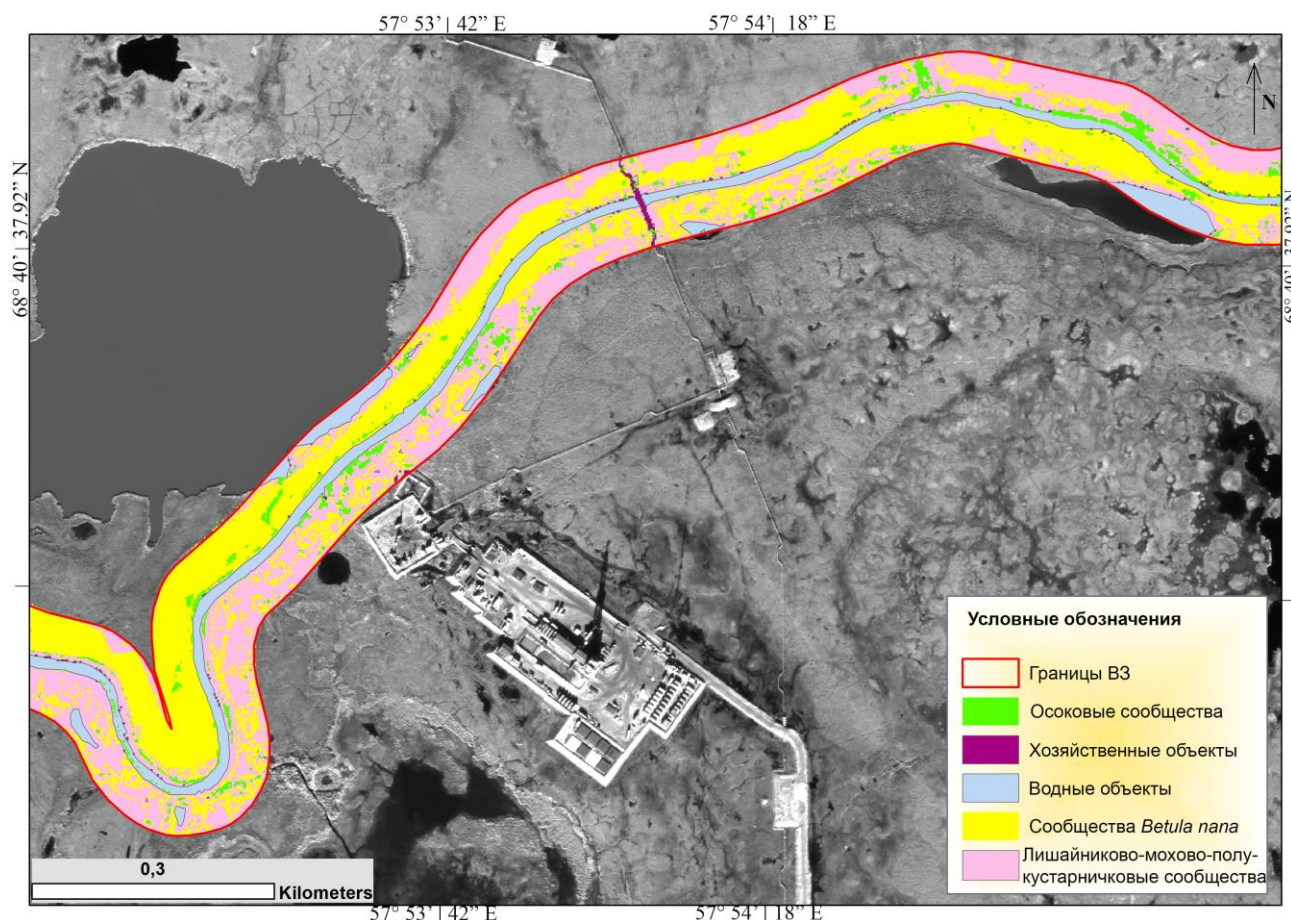


Рис. 9. Участок карты ВЗ р. Хараюнко, представляющий различные типы растительных сообществ, водные и хозяйственные объекты. **Fig. 9.** A part of a map representing different types of plant communities, water bodies, and economic objects on the river Kharayunko VPZ.

Таблица 5. Точность автоматической классификации хозяйственных объектов разными методами на примере участка водоохраной зоны реки Пярцор-яга. **Table 5.** The accuracy of automatic classification of economic objects by different methods, the Pyartsor-yaga river VPZ.

Тип данных (сенсор)	Точность пользователя, %	Точность классификатора, %
NDBI (MSI)	85.2	81.4
NDBI (OLI)	76.1	80.5
NDBI (WV2)	73.1	76.2
Черно-бел. (WV60)	69.2	67.1

Стоимость изображений высокого пространственного разрешения (особенно многоканальных) не всегда позволяет получить временной ряд таких изображений. Кроме того, автоматическая классификация многоканальных снимков высокого пространственного разрешения может давать слишком низкую достоверность для некоторых классов растительности в зависимости от времени получения изображения. Трудности при автоматической классификации могут наблюдаться, когда аспектирующие виды находятся в фенофазах, не позволяющих различать такие виды по их спектральным характеристикам с

достаточной точностью (например, при их переходе к зимнему покою), что также отмечено и в литературных источниках (Tutubalina, Rees, 2001; Зимин и др., 2014). В связи с этим целесообразно дополнительно использовать ДДЗЗ среднего пространственного разрешения, относящиеся к различным датам вегетационного сезона.

Анализ полевых материалов и спутниковых данных показал, что растительный покров обследованных ВЗ водных объектов НАО в целом достаточно типичен для зоны арктических тундр (Лавриненко, 2012; Лавриненко, Лавриненко, 2014, Самозаращение ..., 2014), в том числе других сходных участков тундр НАО, обследованных ранее (Программа мониторинга ..., 2001; Отчет ..., 2014). Выявленные пространственные и видовые различия в растительном покрове ВЗ также в значительной степени обусловлены особенностями строения долин рек в пределах ВЗ, комплексом абиотических факторов, а также наличием и характером антропогенной нагрузки. В границах обследованных участков ВЗ рек на территориях с относительно небольшим антропогенным воздействием в т.ч. при низкой пастбищной нагрузке, представлен в основном коренной растительный покров.

На участках с высокой антропогенной нагрузкой (как правило, вблизи населенных пунктов и хозяйственных объектов) отмечены в разной степени нарушенные фитоценозы.

Коренной растительный покров на обследованной территории представлен в основном **травяно-моховыми** тундровыми фитоценозами (в основном злаковыми или осоковыми), **травяно-мохово-кустарничковыми** фитоценозами с участием стлаников, **маршами** на периодически затопляемых морем территориях (в основном, сфагновыми, сфагново-осоковыми, осоковыми и, отчасти, кустарничковыми фитоценозами), **кустарничковыми** сообществами (ивняками, ерниками), **лишайниково-кустарничковыми** сообществами. В целом преобладают травяно-моховые тундры.

Из экологических групп, основную часть всех типов коренных фитоценозов составляют виды стресс-толеранты, что обычно для тундр.

Исследованные территории ВЗ рек НАО представляют собой ландшафты различного происхождения (Lavrinenko, 2012), что влияет на состав коренной растительности. Наиболее южные участки в окрестностях месторождения им. Р. Требса и пос. Каратайка заняты б.ч. травяными и травяно-моховыми тундрами. В окрестностях пос. Амдерма и в северной части обследованных ВЗ в окрестностях месторождения им. Р. Требса преобладают моховые тундры, мохово-кустарничковые тундры, лишайниково-кустарничковые тундры. Доля кустарничковых фитоценозов в целом невелика, особенно в черте ВЗ рек окрестностей пос. Амдерма. Кустарничковые сообщества, очевидно, произрастают на тех участках, где в зимний период наиболее длительно задерживается снежный покров. На более северных территориях отмечено больше низких ерников, чем ивняков. На наиболее южных участках ВЗ обнаружены самые высокие ивняки (до 1.8 м высотой). Самые существенные отличия по видовому составу от прочих сообществ отмечены для маршей (на территориях аккумулятивного происхождения), которые отмечены в самых северных частях окрестностей месторождения им. Р. Требса; а также скалистые участки, расположенные, как правило, в южных частях ВЗ рек, протекающих с юга на север и в черте ВЗ оз. Большое Тоинто).

Как и ожидалось, существенно *нарушенные фитоценозы* приурочены в основном к окрестностям населенных пунктов, месторождения им. Р. Требса, а также к дорогам и прочим хозяйственным объектам. Повсеместно движение транспорта по тундрам, строительство и эксплуатация различных сооружений, отмеченные в границах некоторых ВЗ, провоцируют активизацию эрозионных процессов в речных долинах из-за повреждения, трансформации или уничтожения растительного покрова. Отмечено, что восстановление нарушенного растительного покрова происходит за счет зарастания преимущественно видами, которые нельзя отнести к типичным стресс-толерантам, а их ареал выходит за пределы зоны арктических тундр.

Полученные результаты подтверждают, что, несмотря на высокий потенциал использования автоматизированной обработки ДДЗЗ для исследования труднодоступных территорий, таких как заболоченные тундры в пределах водоохранных зон рек, верификация данных автоматизированного дешифрирования является необходимым условием для получения достоверных результатов классификации и повышения детальности карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (редакция от 29.12.2014). [Электронный ресурс www.consultant.ru (дата обращения 28.06.17)].
- Геологическая служба США. 2017. Данные дистанционного зондирования со спутников Landsat. [Электронный ресурс <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 17.04.2017)].
- Европейское Космическое Агентство. 2017. Данные дистанционного зондирования со спутников Sentinel-2. [Электронный ресурс <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 18.05.2017)].
- Зимин М.В., Тутбалина О.В., Голубева Е.И., Рус Г.У. 2014. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. № 4. С. 34-41.
- Игловский С.А. 2013. Антропогенная трансформация мерзлотных условий европейского севера России и ее последствия // Арктика и Север. № 10. С. 107-123.
- Козлова М.В. 2011. Растительность как индикатор климатических изменений в Дельте Терека // Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова. С. 266-271.
- Лавриненко И.А. 2012. Дистанционный мониторинг растительности маршей побережья Баренцева моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9. № 2. С. 67-72.
- Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. 2014. Растительный покров оленьих пастбищ острова Колгуев: преемственность исследований и современные подходы. // Труды международной научной конференции «Ботаника: история, теория, практика», Санкт-Петербург, 24 июня 2014 г. С.-Пб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 124-130.
- Миркин Б.М. Наумова Л.Г. 2012. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: Гилем. 488 с.
- Миркин Б.М. Наумова Л.Г. 2014. Краткий энциклопедический словарь науки о растительности. Уфа: Гилем. 288 с.
- Отчет по договору № 2001-9 «Разработка программы экологически безопасной деятельности предприятий нефтяного комплекса на территории НАО». 2001. Санкт-Петербургский Научный Центр РАН. В 2-х книгах. Т. 1. 296 с.; Т. 2. 302 с.
- Программа мониторинга окружающей среды и состояния недр янгарецкого лицензионного участка. 2014. Отчет об инженерно-технологической работе. Тема 17404. Уфа.
- Самозаращение нарушенных земель Севера. 2014 / Ред. Л.П. Капелькина, О.И. Сумина. С.-Пб.: ВВМ. 207 с.
- Тутбалина О.В. 2006. Изучение сезонной динамики растительности Кольского полуострова по снимкам Terra Modis // Исследование Земли из космоса. № 1. С. 59-67.
- Basso B., Cammarano D., De Vita P. 2004. Improving the Normalized Difference Built-Up Index to Map Urban Built-Up Areas Using a Semiautomatic Segmentation Approach // Rivista Italiana di Agrometeorologia. Vol. 1. P. 36-53.
- Clevers J.G.P.W. 1991. Application of the WDV in Estimating LAI at the Generative Stage of Barley // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 46. P. 37-47.
- Congalton R.G. 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data // Remote Sensing of Environment. Vol. 37. P. 35-46.
- ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 1

- Gautam V.K., Gaurav P.K., Murugan P., Annadurai M.* 2015. Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation // *Aquatic Procedia*. Vol. 4. P. 739-746.
- Grime J.P.* Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory // *American Naturalist*. 1977. Vol. 111. P. 1169–1194.
- He C., Shi P., Xie D., Yuanyuan Z.* 2010. Improving the Normalized Difference Built-up Index to Map Urban Built-Up Areas Using a Semiautomatic Segmentation Approach // *Remote Sensing Letters*. Vol. 1. № 4. P. 213-221.
- Hua L., Qinhuo L.* 2008. Comparison of NDBI and NDVI as Indicators of Surface Island Effect in MODIS Imagery // *Proceedings of SPIE*. Vol. 7285. P. 728503 (номер публикации в электронном издании).
- Lavrinenko I.A.* 2012. Landscape Diversity of Specially Protected Natural Territories of Nenets Autonomous Okrug // *Geography and Natural Resources Pleiades Publishing Ltd*. Vol. 33. № 1. P. 43-51.
- Lumbuenamo S.D.* 1990. Assessment of Biomass Dynamics of a Semi-Desert Grassland by Remote Sensing Techniques // A Dissertation Submitted to the Faculty of the Department of Soil and Water Science. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Graduate College. The University of Arizona. 125 p.
- Plourde L., Congalton R.G.* 2003. Sampling Method and Sample Placement: How Do They Affect the Accuracy of the Remotely Sensed Maps? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. P. 289-297.
- Remote Sensing Image Analysis*. 4th ed. 2006 / Eds. J.A. Richards, X. Jia. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 454 p.
- Srinivas P., Das B.K., Saibaba J., Krishnan R.* Application of Distance Based Vegetation Index for Agricultural Crops Discrimination // *Proceedings of the XX ISPRS Congress*. Istanbul, Turkey. IAPRS Vol. XXXV. Commission 7. № 215 [Электронный ресурс <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/215.pdf> (дата обращения 16.09.2015)].
- Tutubalina O.V., Rees W.G.* 2001. Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Norilsk (1961-1999) // *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 32. P. 191-203.
- Xu H.* 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 27. № 14. P. 3025-3033.
- Xu H.* 2007. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-Oriented Index Combination Technique // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 73. № 12. P. 1381-1391.
- Xu-kai Z., Xia Z., Qiong-Qiong L., Baig M.H.A.* 2012. Automated Detection of Coastline Using Landsat TM Based on Water Index and Edge Detection Methods // *Proceedings of the Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*. Vol. 978-1-4673-1947-8. P. 153-156.

**USE OF REMOTE SENSING DATA FOR THE STUDY OF TUNDRA PHYTOCENOSSES;
A CASE STUDY ON THE WATER PROTECTION ZONES
ON THE NENETS AUTONOMOUS DISTRICT RIVERS**

© 2018. M.V. Kozlova, G.Sh. Tursunova, O.V. Gorelits, I.V. Zemlianov

*N.N. Zubov State Oceanographic Institute
Russia, 119034, Moscow, Kropotkinsky Lane, 6. E-mail: gorelits@mail.ru*

The article focuses on the methods of vegetation cover mapping on the water protection zones of the rivers in the Northern part of the Nenets Autonomous District (NAD), based on remote sensing, and field data. The details of the processing of multispectral satellite images of high and medium spatial resolution and panchromatic images for the tundra territories are shown. For the first time the detailed maps of plant cover for the water protection zones on the territory of the NAD rivers were composed on the basis of remote sensing data. Locations of the plant communities, subjected to human impact were detected either.

Keywords: vegetation cover, water protection zone, remote sensing, human impact, tundra.

DOI: 10.24411/2542-2006-2017-10005