

Крутских Н.В.<sup>1</sup>, Миронов В.Л.<sup>2</sup>, Рязанцев П.А.<sup>3</sup>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ БОЛОТНЫХ МАССИВОВ

### АННОТАЦИЯ

На первом этапе изучения болотных массивов эффективно использование ГИС и спутниковых снимков. По мультиспектральным спутниковым снимкам анализируется пространственная структура разнообразия микроландшафтов, выявляются основные неоднородности болотных массивов. В работе рассматриваются два приозерных болота – Шуйские плавни и Равдукорби, расположенные в пределах бассейна Онежского озера. Исследуемые болота относятся к естественным пойменным. На них встречается три группы биотопов – преимущественно супераквальные, умеренно супераквальные и кратковременно супераквальные. Растительный покров болота Шуйские плавни представлен набором эвтрофных сообществ и образует несколько следующих друг за другом поясов, представленных черноольшаниками и березняками болотно-травяными, ивово-разнотравными, разнотравными, осоковыми, тростниковыми и камышовыми сообществами. Растительный покров болота Равдукорби на открытых участках болота представлен преимущественно осоково-сабельниковыми, ивово-сабельниковыми и травяно-кустарничково-сфагновыми сообществами, а на лесных участках – березняками болотно-травяными, сосняками вахтово-сфагновыми мезоевтрофными и сосново-кустарничково-сфагновыми мезоолиготрофными сообществами. В связи с тем, что оба болота примыкают к озерам с большим удельным водосбором, они испытывают регулярные подтопления в периоды половодий, что отражается как на растительности, так и на геохимических показателях. Основой для проведения дешифрирования являются данные космической съемки Landsat8. Тематическая обработка снимка включала создание растров путем вычисления спектральных индексов – NDVI, NDMI, индекс оксидов железа; температуры подстилающей поверхности. На основе анализа главных компонент проведена неконтролируемая классификация территорий болотных массивов, которая показала высокую сходимость с результатами полевых исследований. Полученная информация является базовой для дальнейшего изучения болотных массивов, построения маршрутной сети, применяемых методах исследований.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дистанционное зондирование, болотные массивы, спектральные индексы, классификация.

---

<sup>1</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, 11. 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: [natkrut@gmail.com](mailto:natkirut@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, 11. 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: [vict.mironoff@yandex.ru](mailto:vict.mironoff@yandex.ru)

<sup>3</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, 11. 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru)

**Natalya V. Krutskikh<sup>1</sup>, Viktor L. Mironov<sup>2</sup>, Pavel A. Ryazantsev<sup>3</sup>**

## THE USE OF GIS-TECHNOLOGIES FOR MIRE STUDIES

### ABSTRACT

GIS and satellite images are efficiently used at the initial stage of mire studies. Multi-spectral satellite images are used to analyze the spatial structure of various microlandscapes and reveal the main heterogeneities of mires. Two perilacustrine mires, Shuiyskie Plavni and Ravdukorbi, located in the Onega Lake basin, are discussed in the present paper. They are considered as natural flood plain mires. Occurring on them are three groups of biotopes: dominantly super-aquatic, moderately supraquatic and short-time supraquatic. The vegetation cover of Shuiskie Plavni Mire consists of eutrophic communities, forming several consecutive belts composed of bog-grass, willow-motley grass, motley grass, sedge, reed and cane black alder and birch forests. The plant cover at the open sites of Ravdukorbi Mire is dominated by sedge-marsh cinquefoil, willow-marsh cinquefoil and grass-dwarf shrub-sphagnum communities and at the forest sites by bog-grass birch stands, mesoeutrophic bogbean-sphagnum pine stands and mesooligotrophic pine-dwarf shrub-sphagnum communities. As both mires adjoin lakes with a large specific watershed, they are regularly flooded in spring. As a result, the vegetation and geochemical indices are affected. Satellite images are deciphered basically using Landsat 8 space survey data. Images were processed thematically using rasters created by calculating the spectral indices NDVI, NDMI, the iron oxide index and the underlying surface index. Non-controlled classification of mire areas, conducted by analyzing major components, showed considerable similarity to the results of field studies. The data obtained will be used to continue mire studies, to construct a trail network and to update current research methods.

**KEYWORDS:** remote sensing, wetland complexes, geophysical studies.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость использования комплексных подходов при изучении болотных экосистем обусловлена сложным строением болотных массивов, наличием внутри них хрупких механизмов внутреннего взаимодействия, также специфическими особенностями биогенного материала, представленного, как правило, торфом и сапропелем. В естественном залегании торф и сапропель представляют собой многокомпонентную полидисперсную систему, находящуюся в обводненном состоянии, свойства которой обладают пространственной и временной изменчивостью.

Как показывает практика, на первом этапе изучения болотных массивов эффективно использование географических информационных систем (ГИС) и спутниковых снимков [Дюкарев и др., 2008]. Так, например, по мультиспектральным спутниковым снимкам можно проанализировать пространственную структуру разнообразия микроландшафтов. Материалы, полученные по результатам обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяют выявить основные неоднородности болотных ландшафтов и обозначить направления дальнейших полевых исследований. Использование спутнико-

---

<sup>1</sup> Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: [natkrut@gmail.com](mailto:natkrut@gmail.com)

<sup>2</sup> Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: [vict.mironoff@yandex.ru](mailto:vict.mironoff@yandex.ru)

<sup>3</sup> Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru)

вых снимков актуально при исследовании труднодоступных территорий и интерполяции информации со сходных изученных территорий [Ардашникова, 2015]. Имеющаяся информация о растительном покрове болот позволяет провести качественное дешифрирование данных дистанционного зондирования в пределах малоизученных и труднодоступных территорий. Результаты дешифрирования являются важными источниками информации для постановки геофизических исследований болотных массивов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются два приозерных болота – Шуйские плавни и Равдукорби, которые расположены в пределах бассейна Онежского озера. Согласно существующей классификации приозерных болот, исследуемые болота относятся к естественным пойменным, при этом на них встречается три группы биотопов – преимущественно супераквальные, умеренно супераквальные и кратковременно супераквальные [Миронов, 2012].

Болото Шуйские плавни (34.292401, 61.859677) примыкает к озеру-плесу Логмозеро с юго-западной стороны. С севера оно ограничено р. Томицей, а с востока – искусственно вырытой траншеей. Общая площадь болота составляет 75 га. Растительный покров болота представлен набором эвтрофных сообществ и образует несколько следующих друг за другом поясов, представленных черноольшаниками и березняками болотно-травяными, ивово-разнотравными, разнотравными, осоковыми, тростниковыми и камышовыми сообществами. Детальное описание этого болота представлено в работе [Миронов, 2012].

Болото Равдукорби (33.226336, 61.698463) расположено вдоль одноименного ручья и примыкает к озеру-плесу Вагатозеро в среднем течении р. Шуи. Растительный покров на открытых участках болота представлен преимущественно осоково-сабельниковыми, ивово-сабельниковыми и травяно-кустарничково-сфагновыми сообществами, а на лесных участках – березняками болотно-травяными, сосняками вахтово-сфагновыми мезоэвтрофными и сосново-кустарничково-сфагновыми мезоолиготрофными сообществами. Детальное описание этого болота представлено в работе [Кутенков, Миронов, 2015]. Поскольку оба болота примыкают к озерам с большим удельным водосбором, они испытывают регулярные подтопления в периоды половодий, что отражается как на растительности, так и на геохимических показателях.

Основой для исследований являются мультиспектральная космическая съемка Landsat8 от 24 мая 2016 г. Геометрическая коррекция снимка выполнена по опорным точкам, также проведена радиометрическая калибровка снимка. Тематическая обработка снимка включала: создание растров путем вычисления спектральных индексов; анализ главных компонент; температуры подстилающей поверхности; неконтролируемая классификация. Полученные индексные изображения отражают различные отношения значений пикселей из разных спектральных каналов снимка. Применение спектральных индексов позволяет дать количественную оценку некоторых характеристик изучаемых болот.

Наиболее распространенным и часто используемым является нормализованный вегетационный индекс NDVI, показывающий, как оценивать состояние растительности и ее биомассу [Carlson, Ripley, 1997]. Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале (Red) и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR). Расчет индекса проводится по формуле:

$$NDVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red)).$$

В работе использован стандартизованный индекс увлажненности (NDMI), который чувствителен к уровню влажности в растительности [Wilson, Sader 2002; Skakunetal., 2003]. Использование этого индекса при исследовании болотных экосистем может иметь существенное значение, поскольку он позволяет выявлять как избыточно увлажненные, так и хорошо дренированные биотопы. Расчет индекса проводится по формуле:

$$NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1).$$

Индекс содержания железа позволяет оценивать присутствие железа в виде окисных и гидроокисных форм. Данный индекс представляет собой отношение яркости в красном и синем диапазонах [Segal, 1982]. Использование данного индекса может иметь значение при оценке экологических условий в разных биотопах и при анализе встречаемости видов с разной устойчивостью к железу.

Космические снимки в тепловом инфракрасном диапазоне отражают излучение объектов поверхности. При этом растительный покров, в зависимости от видового состава, состояния, проективного покрытия и других свойств может характеризоваться различными тепловыми и излучательными свойствами [Грищенко, Буторина, 2017]. На тепловых снимках растительность хорошо дешифрируется в период активной вегетации, когда в связи с испарением влаги с поверхности листьев интенсивность теплового излучения понижается. Данные тепловых каналов мультиспектральных снимков Landsat (Band10 и 11) могут быть преобразованы из спектрального излучения в яркость, которая является эффективной температурой [Landsat...]. Формула преобразования следующая:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

где:

$T$  – температура яркости, в Кельвинах;

$L_\lambda$  – спектральное излучение ( $\text{Watts} / (\text{m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m})$ );

$K_1$  – константа термического преобразования для диапазона (K1\_CONSTANT\_BAND\_n из метаданных);

$K_2$  – константа термического преобразования для диапазона (K2\_CONSTANT\_BAND\_n из метаданных).

На основании результатов анализа главных компонент проведена неконтролируемая классификация методом Isodata. Согласно данному методу, основанному на кластерном анализе, к одному классу относятся пиксели, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков. Преимуществами алгоритмов неконтролируемой классификации являются необязательное условие наличия информации о свойствах дешифрируемой местности, меньшая зависимость от человеческого фактора, создание уникальных классов [Зубков, Скрипачев, 2007].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

– По результатам полевых наблюдений в пределах болота Равдукорби выделены следующие сообщества:

– *Осоково-сабельниковые* и *ивово-сабельниковые* сообщества расположены вдоль ручья. Данные сообщества соответствуют группе умеренно супераквальных болотных биотопов, их подтопление происходит ежегодно даже при незначительных весенних паводках. В основном к данной группе относятся различные комбинации сообществ с доминированием *Comarum palustre*: от ивово-сабельниковых до осоково-сабельниковых. Проективное

покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 80–100 %. Моховой покров отсутствует, за исключением единичных подушек *Sphagnum fimbriatum* и рассеянно встречающихся *S. squarrosum*, *Drepanocladus aduncus*. Мощность торфяной залежи составляет 100–120 см. Торфа низинные, со значительной примесью минеральных частиц, сильно уплотненные. Они соответствуют пойменным болотным почвам низинного подтипа, в которых регулярно отмечаются признаки гидрогенной аккумуляции железа. Их образование протекает при одновременном участии болотного и аллювиального почвообразовательного процессов.

– *Травяно-кустарничково-сфагновые сообщества* с редким древостоем березы развиты преимущественно по правому берегу р. Равдукорби, где образуют четко выраженную полосу вслед заивово-травяными сообществами. Отмечается существенное развитие сфагнового покрова, занимающего от 20 (отдельные подушки) до 80 % (сплошной ковер) площади участков. Отмечается редкий древостой и обилие кустарничков. Сообщества соответствуют группе кратковременно супераквальных биотопов. Мощность торфяных отложений под данными сообществами составляет 110–120 см.

– *Березняки болотно-травяные* образуют лесные бордюры шириной до 50 м вдоль открытого участка. В древостое доминирует береза пушистая, имеется примесь ольхи черной, реже ивы козьей и сосны. Сомкнутость древостоя варьирует от 0,8 до 0,9, высота – от 10 до 16 м. Травяно-кустарничковый ярус достаточно густой – 40–75 %. Моховой ярус прерывистый, общее проективное покрытие составляет 40–60 %. Мощность торфяной залежи аналогична приведенным выше участкам.

– *Сосняки вахтово-сфагновые*. Древостои смешанные, формула древостоя 6С2Б2Олч+Е. Участие ели увеличивается к минеральному берегу. Сомкнутость крон варьирует от 0,5 до 0,8. Высота сосны и березы составляет 16–20 м, ольхи черной – 14–16 м. В подросте обильно встречается ольха, обычно ель, сосна, береза, реже – ива пепельная, рябина, крушина. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет от 25 до 50 %. Редкая встречаемость в таких сообществах *Sphagnum warnstorffii*, что указывает на обедненный водноминеральный режим.

– *Сосново-кустарничково-сфагновые мезоолиготрофные сообщества*. Сомкнутость древостоев 0,3, снижаясь до 0,1 к центру участка. Высота также снижается с 12 до 6 м. В древостое полностью отсутствует ольха черная. Береза и ель присутствуют в качестве примеси. В центре участка древостой образован только низкой разреженной сосной. В растительном покрове преобладают виды верховых болот. Травяно-кустарничковый ярус имеет сомкнутость 40–50. Сфагновый покров сплошной, сложен олиготрофным *Sphagnum angustifolium* с примесью *S. magellanicum* и *S. russowii*, минеротрофные виды мхов полностью отсутствуют, лесные мезофиты встречаются в небольшом количестве по повышениям микрорельефа. Таким образом, растительный покров данного участка свидетельствует о его прогрессирующей олиготрофизации.

В пределах болота Шуйские плавни выделены следующие сообщества:

– *Черноольшаники болотно-травяные*. В древесном ярусе преобладает *Alnus glutinosa*, реже встречается *Betula pubescens*. Общая сомкнутость древесного яруса 50 %. На невысоких приствольных кочках, которые возвышаются над уровнем воды на 10–20 см, представлены сфагновые (*Sphagnum centrale*, *S. teres*, *S. squarrosum*) и зеленые мхи (*Pleurozium schreberi*, *Dicranum scoparium*, *Aulacomnium palustre*), а также лесные и болотные кустарники и травы. В топких межкочьях встречаются виды гипновых мхов, *Equisetum fluviatile* и *Carex rostrata*; несколько раз был встречен краснокнижный вид *Malaxis monophyllos*.

– *Березняки болотно-травяные*. Ширина полосы варьирует от 30 до 80 м. Диаметр стволов березы – 4–8 см, высота – 6–9 м, сомкнутость крон – в среднем 10–15 %; встречаются единичные особи *Alnus glutinosa*. Жизненность большинства экземпляров



*Betula pubescens* сильно ослаблена, примерно 20–25 % особей составляет сухой. Возобновление происходит преимущественно за счет формирования поросли. Имеются отдельные экземпляры *Salix phylicifolia* и *S. pentandra*. В травяном ярусе преобладают *Equisetum fluviatile*, *Menyanthes trifoliata*, *Comarum palustre* и *Calamagrostis canescens*. УГВ находится на 10 см выше торфяной залежи.

– *Ивово-разнотравные сообщества*. Ширина полосы с этими сообществами составляет от 30 до 80 м. Деревья представлены низкими (2–4 м), преимущественно усохшими экземплярами *Betula pubescens*, диаметр ствола 3–5 см, сомкнутость – 2–3 %; кустарники представлены ивами *Salix phylicifolia*, *S. lapponum*, *S. rosmarinifolia*. УГВ у ивово-осоково-вейниковых сообществ примерно совпадает с поверхностью торфа, а у ивово-травяных залегаёт на 5 см выше поверхности залежи.

– *Разнотравные и осоковые сообщества*. Занимают центральную часть болота, ширина полосы этих сообществ составляет около 500 м. Среди них встречаются сообщества *Menyanthes trifoliata* + *Carex chordorhiza*, *Carex diandra* + *Comarum palustre*, *Carex lasiocarpa* + *Equisetum fluviatile*, *Carex acuta* + *Comarum palustre*, *Carex aquatilis* – *Warnstorfia fluitans*, *Carex rostrata* + *Equisetum fluviatile*. УГВ варьирует от 0 до 30 см над поверхностью торфа. На поверхности воды в сообществе *Carex acuta* + *Comarum palustre* был найден красно-книжный вид печеночника *Ricciocarpos fluitans*.

– *Тростниковые сообщества*. Сообщества *Phragmites australis* – *Carex rostrata* образуют густые заросли. Сомкнутость тростника составляет 70–80 %. Побеги *Phragmites australis* имеют высокую жизненность, их высота составляет 3 м. Сообщество тростника расположено на сплавине, неравномерно прикрепленной к дну, поэтому УГВ резко сменяется. В участках с высоким УГВ (15–50 см) доминируют гидрофиты *Lemna trisulca* и *Hydrocharis morsus-ranae*; при меньшем обводнении (0–15 см) доминируют *Carex rostrata*, *Comarum palustre* и *Sphagnum teres*.

– *Плавнево-литоральные сообщества*. Сообщества *Phragmites australis* + *Scirpus lacustris* расположены на торфяно-глинистых отложениях. Они имеют своеобразный микрорельеф: сами плавни сформированы видами *Phragmites australis* и *Scirpus lacustris*, а в окнах между ними преобладают гипновые мхи, *Carex acuta* и нейстофиты *Alisma plantago-aquatica*, *Potamogeton sp.*, *Nuphar luteum*, *Nymphaea candida*.

*Индекс NDVI*. Данный индекс отражает поясность, которая имеется в естественном расположении растительных сообществ (рис. 1). По рисунку прослеживается достаточно четкая закономерность в увеличении значений NDVI при увеличении облесения. Эта тенденция отражает естественную закономерность в увеличении растительной биомассы от сообществ открытых участков приозерных болот к участкам с развитым древесным ярусом. Например, на болоте Равдукорби осоково-сабельниковые сообщества вдоль ручья имеют значения индекса 0,2–0,3, что соответствует низкому уровню биомассы и разреженной растительности.

В пределах болота Шуйские плавни аналогичные значения NDVI имеют плавнево-литоральные сообщества. Немного большими значениями индекса характеризуются тростниковые, травяные и травяно-осоковые сообщества. В травяно-кустарничковых сообществах значения NDVI увеличиваются до 0,5–0,6. Березняки болотно-травяные показывают значения NDVI 0,6–0,65, а сосняки вахтово-сфагновые 0,65–0,7.

Значения NDVI претерпевают существенную динамику в рамках вегетационного периода, что связано с постепенным увеличением биомассы к середине вегетационного периода и ее деградацией к окончанию вегетации. Потенциально различие в NDVI может применяться для дифференциации растительных сообществ еще на стадии предварительного планирования исследования. Однако решение этих частных задач требует более углубленных исследований.

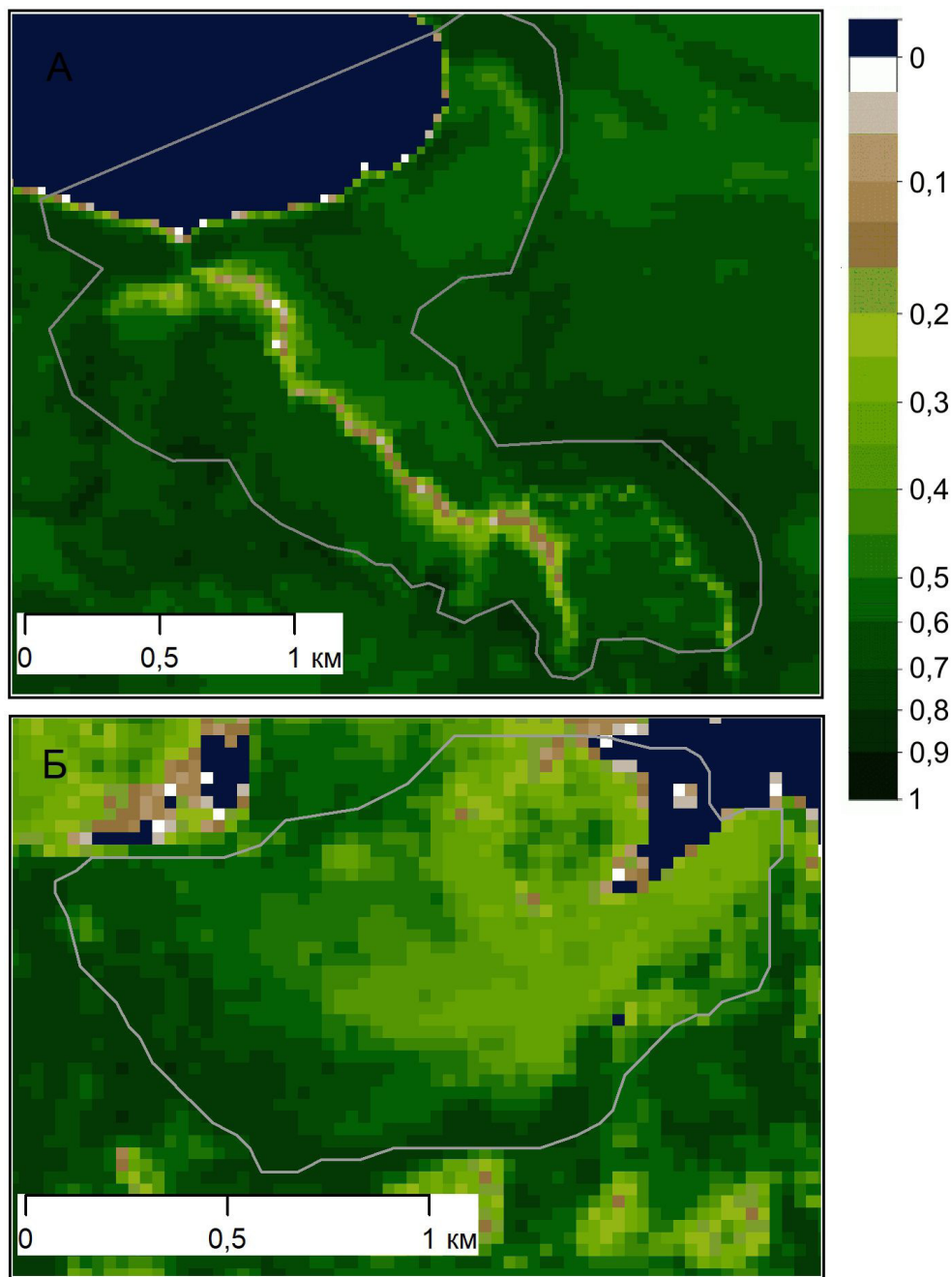


Рис. 1. Нормализованный вегетационный индекс NDVI  
болот Равдукорби (А) и Шуйские плавни (Б)  
Fig. 1. The normalized vegetation index NDVI  
of the mires Ravdukorbi (A) and Shuiyskie Plavni (B)

*Индекс NDMI.* Отражает общую увлажненность болотных участков (рис. 2). После периода весеннего половодья происходит спад уровня воды в озерах и водотоках, поэтому участки, граничащие с ними, испытывают более выраженный дренаж, чем удаленные участки. В связи с этим осоковые, травяно-осоковые, тростниковые сообщества имеют показатели NDMI около 0, а более удаленные сосняники, березняки и черноольшаники обычно характеризуются значениями NDMI от 0,2 до 0,5. Следует отметить, что значения NDMI, полученные по космоснимкам за ранневесенний и летний периоды, могут существенно отличаться, поскольку за этот срок происходит существенный спад уровня воды.

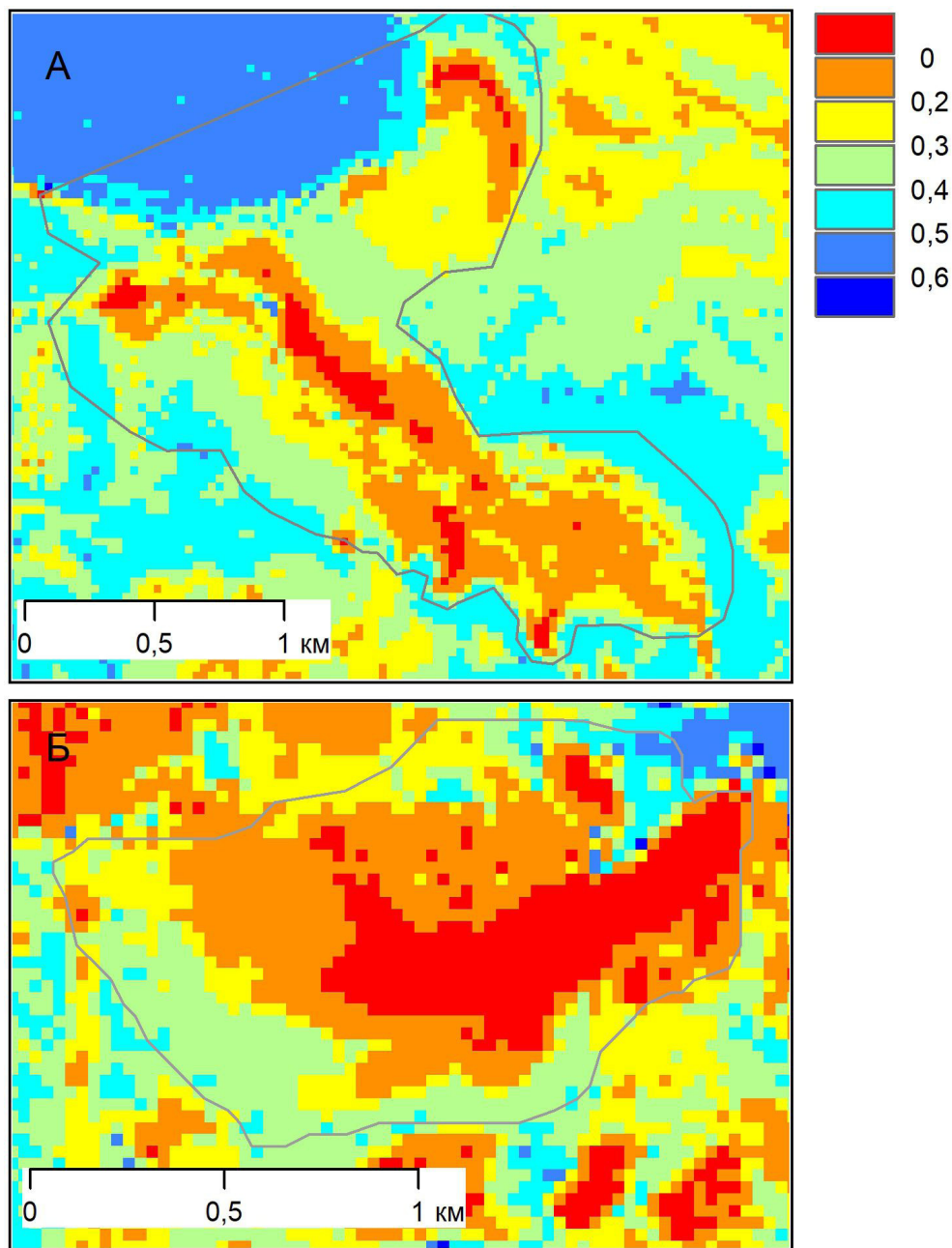


Рис. 2. Индекс увлажненности болот Равдукорби (А) и Шуйские плавни (Б)  
Fig. 2. Moisture index of the mires Ravdukorbi (A) and Shuyskie Plavni (B)

*Индекс содержания железа.* Для болотных экосистем этот индекс обычно имеет высокие значения. Это связано с некоторыми геохимическими особенностями почвообразования, в частности, с действием геохимического кислородного барьера. Так, кислые глеевые и болотные воды в условиях недостатка кислорода интенсивно выщелачивают из минеральных пород железо и марганец, которые в восстановительной среде существуют в виде ионов  $Fe^{+2}$  и  $Mn^{+2}$ . При выходе этих вод на земную поверхность происходит окисление этих ионов на воздухе с образованием нерастворимых гидроксидов и оксидов. Подобные выходы фиксируются высокими значениями соотношения яркости в красном и синем каналах мультиспектрального снимка.

Применительно к обследованным объектам следует отметить, что в целом содержание железа на болоте Шуйские плавни существенно больше, чем на болоте Равдукорби



(рис. 3). Это может быть связано с характером питающих вод, уровнем режимом материнских озер. Определенное искажение значения индекса может вносить густой растительный покров. На болоте Шуйские плавни высокое содержание железа отмечено в разнотравных, осоковых и тростниковых сообществах.

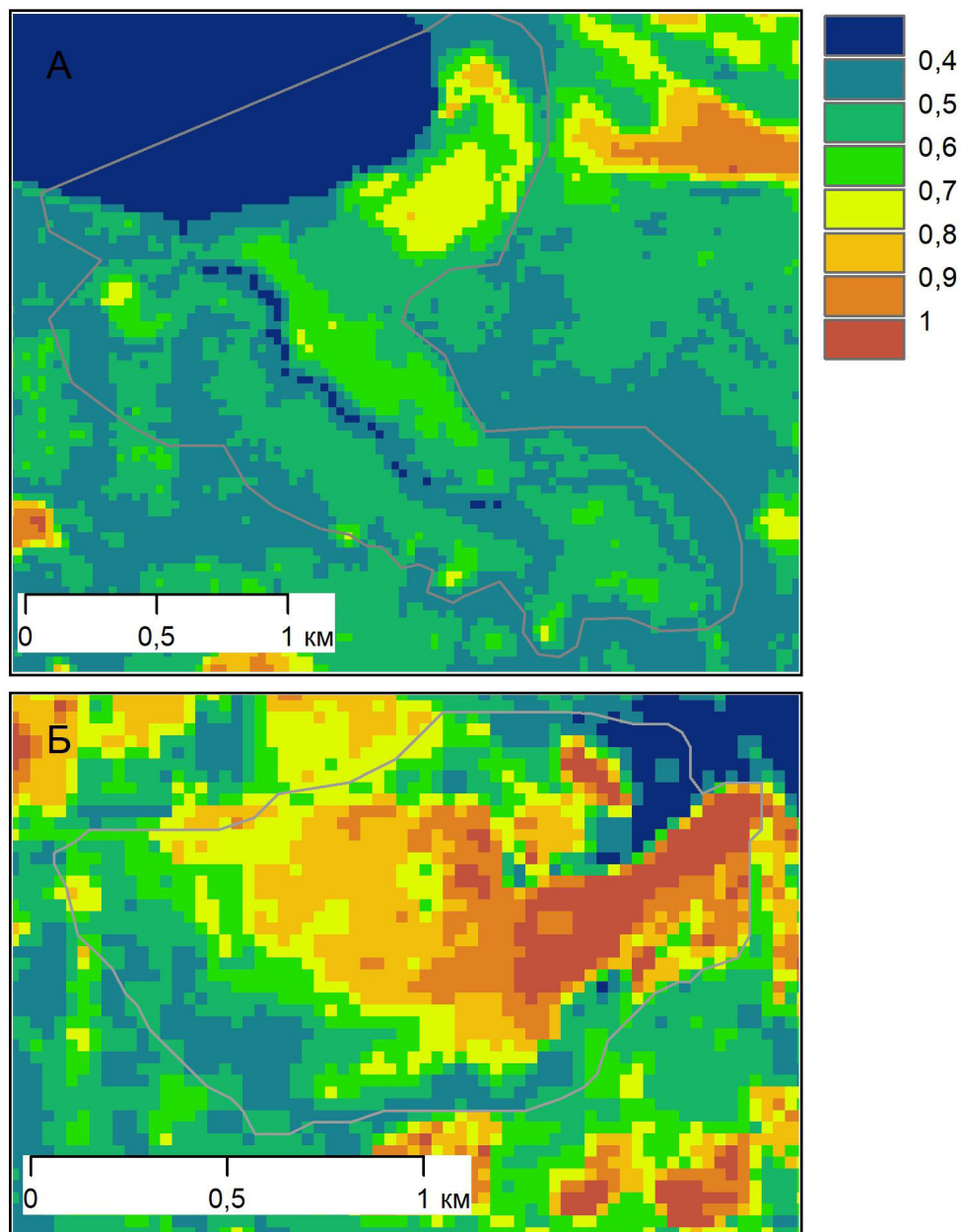


Рис. 3. Индекс содержания железа поверхности  
болот Равдукорби (А) и Шуйские плавни (Б)  
Fig. 3. The iron index on the surface  
of the mires Ravdukorbi (A) and Shuiskie Plavni (B)

*Температура.* Известно, что термический режим торфяных и минеральных почв существенно отличается [Казаков, 2013]. По сравнению с автоморфными почвами минеральных островов, гидроморфные торфяные почвы характеризуются повышенным увлажнением и медленным нагревом. Более выраженный нагрев торфяных почв происходит в условиях хорошего дренажа и при невысоких значениях альbedo растительного покрова.

Вклад в температуру поверхности может вносить питание болотных участков. Например, выходящие на поверхность холодные грунтовые воды могут обуславливать снижение температуры на некоторых участках сообществ. Но в целом, в летний период поверхность болот остается относительно холодной и менее подвержена температурным колебаниям, чем минеральные почвы.

На болоте Шуйские плавни наибольшие температуры отмечаются в ивово-разнотравных, разнотравных и осоковых сообществах (рис. 4). Меньший нагрев отмечен в лесных сообществах с выходами грунтовых вод и сообществах с высоким обилием тростника. На болоте Равдукорби более высокие температуры отмечаются в травяно-кустарничково-сабельниковых и ивово-сабельниковых сообществах, и, частично, в березняках болотно-травяных. Низкие температуры отмечаются здесь также для участков лесных сообществ (например, сосняках и березняках болотно-травяных), в которых происходит разгрузка грунтовых вод с пониженной температурой.

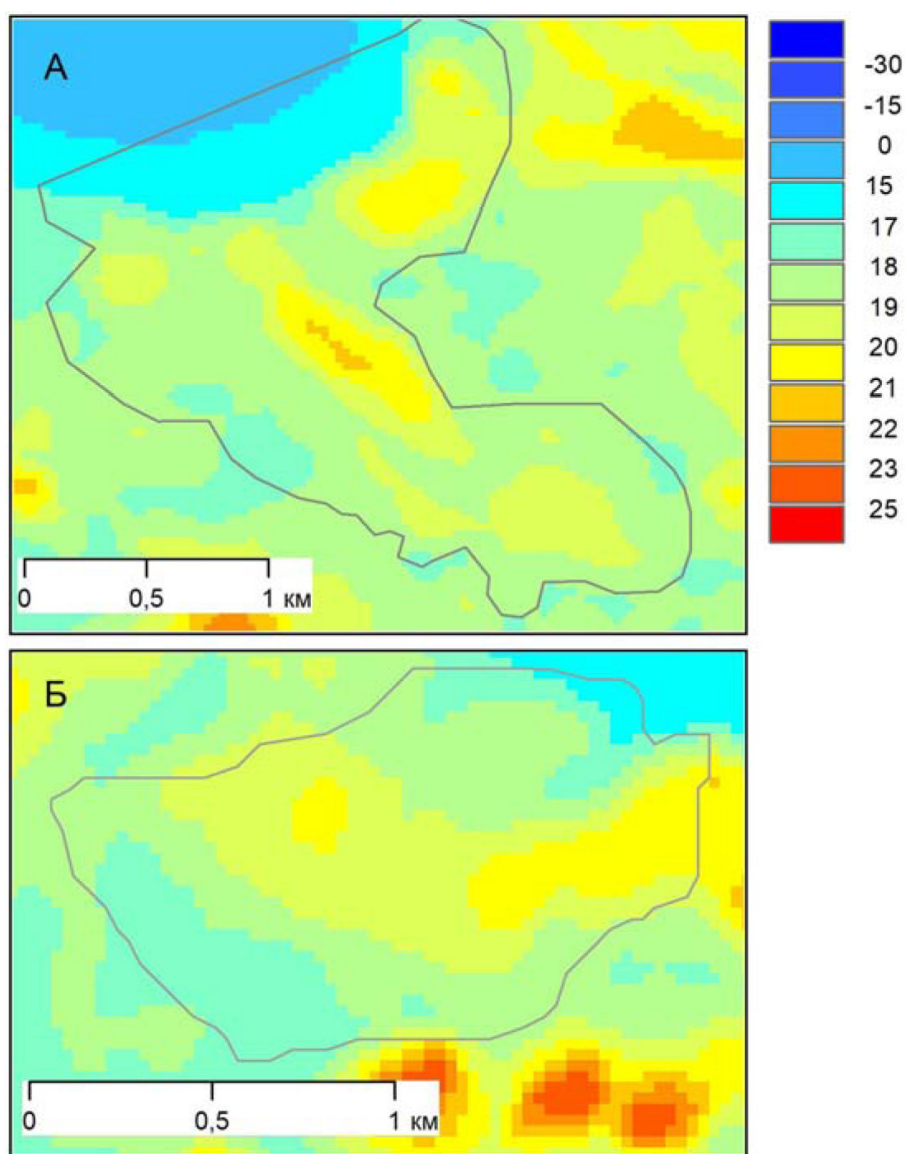


Рис. 4. Температура подстилающей поверхности болот Равдукорби (А) и Шуйские плавни (Б)  
Fig. 4. The temperature of the underlying surface of the mires Ravdukorbi (A) and Shuiskie Plavni (B)

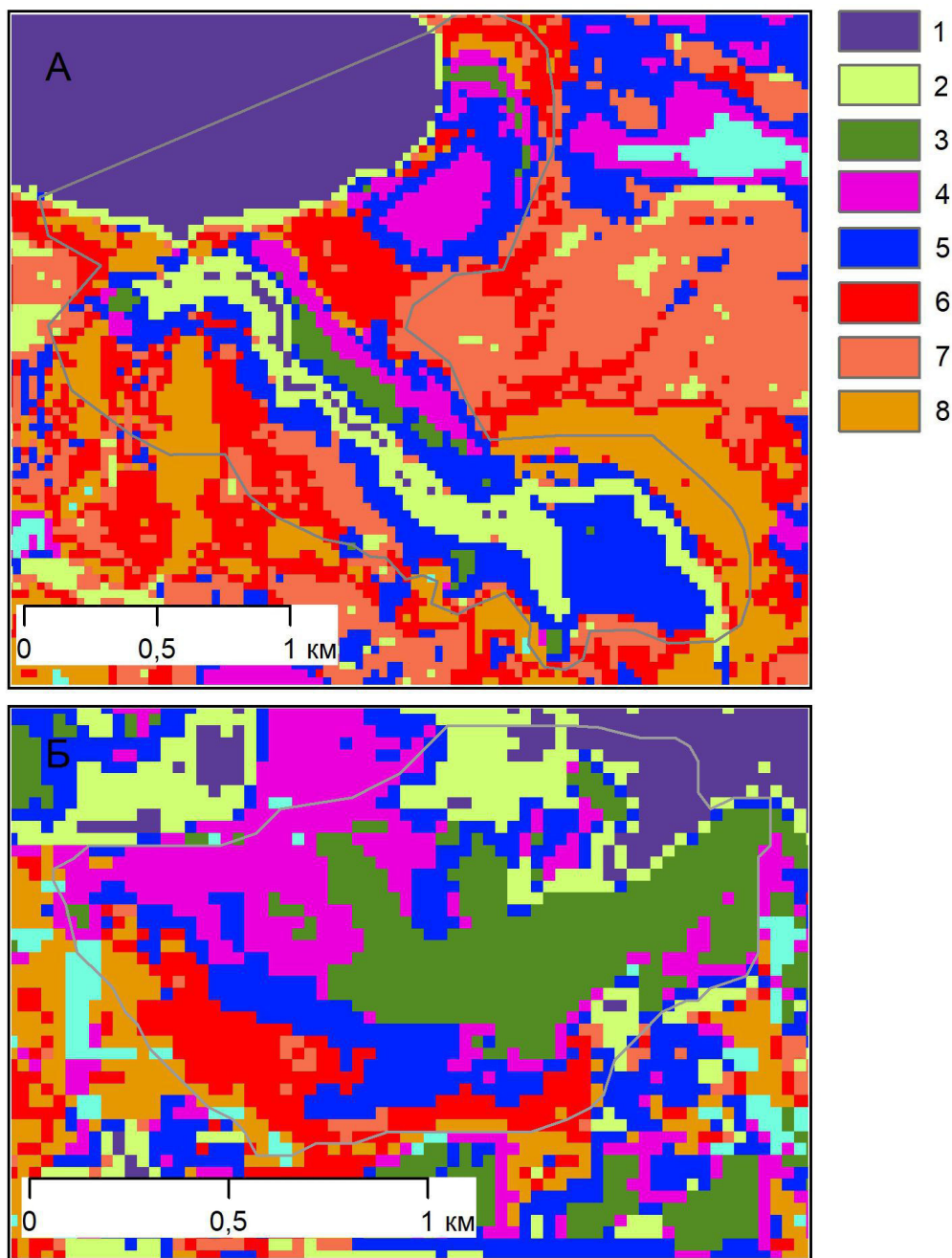


Рис. 5. Результаты неконтролируемой классификации территории болот Равдукорби (А) и Шуйские плавни (Б)

Номера классов соответствуют обозначениям в таблице

Fig. 5. The results of the uncontrolled classification of the territory of the mires Ravdukorbi (A) and Shuiyskie Plavni (B).

Class numbers correspond to the notations in the table

В ходе неконтролируемой классификации в пределах болот выявлено 7 классов поверхности (рис. 5). Территории внутри выделенных классов характеризуются схожими индексными значениями (табл.), что позволяет интерпретировать результаты классификации. Сравнительный анализ выделенных классов и данных полевых исследований выявил хорошее их соответствие. Это позволяет использовать эти данные при подготовке работ по исследованию болотных комплексов.

Классы наземного покрова болотных массивов  
Classes of ground cover of the marshland

№ класса	Преобладающий растительный покров	NDVI	Индекс увлажненности	Индекс оксидов Fe
1	Водные объекты	< 0	> 0,5	0,35
2	Осоково-сабельниковые, плавнево-литоральные сообщества	0,2–0,3	0,1–0,2	0,5–0,6
3	Тростниковые сообщества	0,2–0,3	> 0	0,9–1
4	Сосново-кустарничковые, травяно-кустарничковые сфагновые сообщества	0,5–0,6	0,1–0,2	0,65–0,8
5	Березовые болотно-травяные, ивово-травяные сообщества	0,55–0,65	0,2–0,3	0,6–0,7
6	Сосняники, черноольшаники, березняки болотно-травяные	0,65–0,7	0,3–0,35	0,45–0,5
7		0,68–0,72	0,35–0,4	0,5–0,55
8	Сосняки	0,7–0,8	0,4–0,45	0,45–0,5

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что данные ДЗ имеют высокую информативность при изучении болотных экосистем и являются средством оптимизации затрат при выполнении наземных работ. Расчет разных спектральных индексов (NDVI, NDMI и др.) для рассматриваемых болот, а также результаты неконтролируемой классификации позволили получить широкий ряд данных о неоднородностях болотного массива. Сопоставление с материалами наземной съемки позволило выявить ботанические и гидрологические параметры болотных комплексов для каждого полученного класса. Наряду с этим выявлена необходимость использования разновременных космоснимков. Это не только повысит достоверность, но обеспечит изучение динамики изменений болотных экосистем. В заключение стоит отметить, что использование ГИС технологий эффективно на первом этапе для определения общих неоднородностей болотных экосистем, а в дальнейшем, при выявлении корреляционных зависимостей спектральных индексов и натурных наблюдений, возможно получение карт детального пространственного распределения болотных биотопов и физико-биологических параметров болот на больших площадях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование осуществлено при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 18-05-00256.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 18-05-00256.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева М.Н., Прейс Ю.И., Дюкарев Е.А. Пространственная структура наземного растительного покрова и типа верхнего слоя торфа северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота по дистанционным и наземным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 4. С. 81–90.



2. *Ардашникова С.В.* Картографирование болотных микроландшафтов на основе спектральной классификации космических снимков RapidEye // *Геоматика*. 2015. № 2 (27). С. 46–51.
3. *Грищенко М.Ю., Буторина С.А.* Исследование возможностей применения тепловых снимков для дешифрирования растительности (на примере островов Беринга и Кунашир). Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2017. № 23(3). С. 71–81. DOI:10.24057/2414-9179-2017-3-23-71-81.
4. *Дюкарев Е.А., Пологова Н.Н., Головацкая Е.А.* Технологии дистанционного зондирования для установления структуры лесоболотных комплексов ключевого участка «Бакчарский» // *Журнал Сибирского Федерального университета. Сер. «Техника и технологии»*. 2008. Т. 1, № 4. С. 334–345.
5. *Зубков И.А., Скрипачев В.О.* Применение алгоритмов неконтролируемой классификации при обработке данных ДЗЗ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 4, № 1. С. 57–62.
6. *Казаков А.А.* Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2013. № 4. С. 161–167.
7. *Мионов В.Л.* Растительный покров и динамика приозерного болота у оз. Логмозеро (Южная Карелия) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14, № 1(5). С. 1324–1327.
8. *Кутенков С.А., Мионов В.Л.* Особенности растительности и торфяных отложений пойменного болота Равдукорби (Карелия) // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Биологические науки*. 2015. № 6. С. 40–47.
9. *Carlson T.N., Ripley D.A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index // *Remote Sensing of Environment*. 1997. V. 62. P. 241–252.
10. *Kearney M.S., Rogers A.S.* Forecasting sites of future coastal marsh loss using topographical relationships and logistic regression. *Wetlands Ecology and Management*. 2010. P. 449–461.
11. *Segal D.* Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data. *Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX, 1982*. P. 949–951.
12. *Skakun R.S., Wulder M.A., Franklin S.E.* Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 86. P. 433–443.
13. *Wilson E.H., Sader S.A.* Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2002. P. 385–396.

## REFERENCES

1. *Alekseeva M.N., Preys Yu. I., Diukarev E.A.* Spatial structure of vegetation cover and top layer of peat of northeastern spurs of the Great Vasyugan mire by remote and ground data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015. V. 326, No 4. P. 8–90 (in Russian).
2. *Ardashnikova S.* Wetland microlandscape mapping based on spectral classification of RapidEye images. *Geomatics*. 2015. No 2(27). P. 46–51 (in Russian).
3. *Carlson T.N., Ripley D.A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 1997. V. 62. P. 241–252.
4. *Diukarev E.A., Pologova N.N., Golovatchkaya E.A.* Spatial Structure of Forest-Mire Complexes at the Key Site "Bakcharsky". *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2008. V. 1, No 4. P. 334–345 (in Russian).

5. *Grishchenko M.Y., Butorina S.A.* Evaluation of the thermal infrared satellite images appliance for vegetation interpretation (case study of Bering and Kunashir islands). Proceedings of the International conference InterCarto/InterGIS. 2017. No 23 (3). P. 71–81 (in Russian). DOI:10.24057/2414-9179-2017-3-23-71-81.
6. *Kazakov A.A.* Remote geothermal mapping of bogs of Western Siberia (by the example of the Tarman swamp massif). Bulletin of the Tyumen State University. Ecology and nature management. 2013. No 4. P. 161–167 (in Russian).
7. *Kearney M.S., Rogers A.S.* Forecasting sites of future coastal marsh loss using topographical relationships and logistic regression. Wetlands Ecol Manage. 2010. P. 449–461.
8. *Kutenkov S.A., Mironov V.L.* Plant communities and peat deposit peculiarities of Ravdukorbi floodplain mire. Scientific notes of Petrozavodsk State University. Biological Sciences. 2015. No 6. P. 40–47 (in Russian).
9. *Mironov V.L.* Plant cover and dynamics of Logmozero limnogenous mire (South Karelia). Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. V. 14, No 1 (5). P. 1324–1327 (in Russian).
10. *Segal D.* Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data. Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX, 1982. P. 949–951.
11. *Skakun R.S., Wulder M.A., Franklin S.E.* Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. P. 433–443.
12. *Wilson E.H., Sader S.A.* Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment. 2002. P. 385–396.
13. *Zubkov I.A.* The algorithms of unsupervised classification in remote-sensing data processing. Modern problems of remote sensing of the earth from space. 2007. V. 4, No 1. P. 57–62 (in Russian).