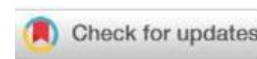


УДК 528.88, 528.9, 631.4, 911.52
<https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323>



Дешифрирование болот Томской области методом кластеризации

© 2025 Д. И. Голубец ^{1, 2, 3}, Е. А. Дюкарев ^{2, 4}

¹ФГБУН Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, улица Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия. E-mail: dimagolubets1203@gmail.com

²ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: egor@imces.ru

³ФГБНУ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, проспект Академика Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 634055, Россия

⁴ФГБУ ВО «Югорский государственный университет», ул. Чехова, 16, г. Ханты-Мансийск, 628012, Россия

Целью работы является тематическое картографирование болотных геосистем Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли высокого пространственного и спектрального разрешения (Sentinel-2) методом K-means для повышения точности оценки площадей и выявления локальных и региональных особенностей распределения болот. В качестве предикторов использованы спектральные каналы (2, 3, 4, 8А, 11) и индексы (NDVI, NDWI, NDBI) за период с апреля по сентябрь 2024 г., обработанные в Google Earth Engine. Картографическая визуализация выполнена в QGIS. Выделено 14 кластеров, объединённых в 7 групп: залесённые, открытые и комплексные болота, древесная и лугово-кустарниковая растительность, водные объекты и открытый грунт. Общая площадь болот составила 49,7% территории области, что на 5,4% превышает ранее опубликованные данные. Наибольшие расхождения – у залесённых болот (+9,32%) и комплексных (–5,87%), что обусловлено высоким разрешением и оптимальным набором предикторов, включая SWIR-канал для определения увлажнённости территории. Результаты подтверждают эффективность безусловной классификации для выделения гомогенных болотных геосистем. Для повышения точности рекомендуется интеграция полевых данных, временных рядов спутниковых снимков и дополнительных предикторов, таких как текстурные и морфометрические параметры.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли; болота; тематическое дешифрирование.

Цитирование: Голубец Д.И., Дюкарев Е.А. Дешифрирование болот Томской области методом кластеризации // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е323. DOI: [10.31251/pos.v8i4.323](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323)

ВВЕДЕНИЕ

Болота представляют собой важнейшие ячейки углеродного цикла, выступающие как природные хранилища углерода, способные и депонировать, и выделять существенные объёмы парниковых газов. Одним из ключевых элементов оценки углеродного баланса болотных экосистем является анализ растительности, основного производителя биомассы и индикатора разных типов болот (Базанов и др., 2009). Эта проблема имеет международный интерес, что подтверждается большим количеством конференций и сборников научных работ по данной тематике (Global Peatlands Assessment ..., 2022). Согласно работе (Терентьева и др., 2020), площади болот Западно-Сибирской равнины варьируются от 50,7 до 58,3 Мга.

Первой картой растительности Западной Сибири является «Карта растительности Западно-Сибирской равнины», составленная под редакцией И.С. Ильиной и общим руководством академика В.Б. Сочавы сотрудниками Института географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР (ныне Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН) (Ильина и др., 1977). В ее основу положена регионально-типологическая классификация, в которой рассмотрена принадлежность растительности Западной Сибири к планетарным и региональным единицам растительности, таким как «тип растительности», «фратрии растительных формаций» и «региональные комплексы». Особенностью данной карты является применение не только инвентаризационного подхода к картографированию растительности, но и эколого-динамического, отражающего как особенности сочетаний определенных растительных группировок в микро- и мезокомбинации, так и выделение их в серии, объединенные одним направлением развития. Впервые такой подход к классификации болотной растительности был предложен Т.К. Юрковской (1968).

Одним из примечательных моментов является использование в болотоведении терминологии из ландшафтоведения (микро-, мезо-, макроландшафт, болотная фация, урочище и т.д.) без использования как такового ландшафтного подхода. Попытка совместить понятийный аппарат приведена в работе (Синюткина, 2012), где применен геосистемный подход к рассмотрению болот и приведена классификация геомер (гомогенных геосистем (Сочава, 1978)) с рассмотрением иерархической структуры южнотаежной лесоболотной васюганской подгруппы геомов в пределах Томской области. В этих работах был применен метод дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) (Синюткина, 2017; Синюткина, Гашкова, 2022) для исследования постпирогенной трансформации растительного покрова участка Большого Васюганского болота. Однако данные работы носят локальный характер, что, тем не менее, не умаляет их важности.

Среди работ, в которых применяется дешифрирование **данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ)** для классификации болот на больших территориях, можно отметить карту болотных комплексов таежной зоны Западной Сибири И.Е. Терентьевой с соавторами (Терентьева и др., 2020), построение которой основано на спутниковых данных Landsat, дешифрированных методом «максимального правдоподобия». Этим автором результаты картографирования болот были использованы для оценки эмиссии метана и диоксида углерода (Терентьева и др., 2017). Следует упомянуть и работу «Спутниковое картографирование растительного покрова России» под руководством Института космических исследований РАН (Барталев и др., 2016). В одной из последних работ приведено расширение класса «болота» на более мелкие единицы, где тестовым участком выступила Томская область (Шинкаренко и др., 2024).

В этих работах применяются методы машинного обучения, относящиеся к группе «обучение с учителем» (Supervised classification). Они хотя и имеют ряд плюсов, таких как: возможность задавать эталонные значения (более тонкая настройка), не требуют экспертной интерпретации результатов, оценивают важность предикторов; но имеют и минусы: требуется очень качественная обучающая выборка (с точными диапазонами значений предикторов для каждого класса), которая охватывает все классы объектов, возможные для выделения с вводными предикторами. Этот недостаток данной группы методов имеет решающее влияние, так как если не учесть все разнообразие объектов, которое возможно определить вводными предикторами или же, наоборот, переучесть, то произойдет либо включение объектов в класс, не соответствующий ему, что завысит результаты, либо излишнее дробление, не соответствующее действительности. В связи с этим мы предлагаем использование методов классификации «без обучения» (Unsupervised classification), плюсами которой является априорное определение количества выделяемых кластеров, тем самым минимизируется влияние человеческого фактора за счет автоматического выделения кластеров; но также имеются и минусы: подходит не для всех типов распределений данных, требуется экспертная интерпретация результатов.

Цель данной работы — тематическое картографирование болотных геосистем Томской области с использованием дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли высокого пространственного и спектрального разрешения (Sentinel-2) методом кластеризации K-means для повышения точности оценки площадей и выявления локальных и региональных особенностей распределения болот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах, перечисленных выше, в качестве предикторов были использованы следующие материалы ДДЗЗ:

1) снимки аппарата MODIS в 2 каналах с пространственным разрешением 230 м (620–670 нм, 841–876 нм), а также данные ASTER GDEM и GTOPO30 с пространственным разрешением 30 м и 30" соответственно (Шинкаренко и др., 2024);

2) спутниковые спектральные данные системы Landsat с пространственным разрешением 30 м (Терентьева и др., 2020);

3) спутниковые спектральные данные системы Sentinel 2, 4, 8, 8A, 12, а также NDVI с пространственным разрешением варьирующемся от 10 до 20 м (Синюткина, Гашкова, 2022).

Поскольку одной из задач данной работы является выявление локальных особенностей пространственного распределения болот, в качестве предикторов были выбраны снимки спутниковой системы Sentinel-2, с облачностью менее 5% от площади покрытия снимка, в спектральных каналах с 2 (Blue), 3 (Green), 4 (Red), 8A (NIR) и 11 (SWIR1), а также спектральные индексы NDWI, NDVI, NDBI (Montero Loaiza, 2021), чтобы учесть максимальное разнообразие характеристик объектов земной поверхности. Для того, чтобы учесть фенологические различия растительности разных

болотных геосистемах, снимки были усреднены с апреля по сентябрь 2024 года. Была применена попытка использования цифровых моделей рельефа и производных характеристик (экспозиция, крутизна, LS-factor, TWI и др.) в качестве предикторов, но, как выяснилось, это привело лишь к созданию большей ошибки кластеризации. Методом дешифрирования объектов был выбран алгоритм машинного обучения – кластеризация K-means. Суть данного метода заключается в разделении набора данных на k кластеров, изначально представленных центроидами – центрами кластеров, случайно расставленными по n-мерному пространству предикторов, где каждый объект, в нашем случае пиксель, относится к ближайшему по расстоянию (зачастую евклидову) кластеру. Алгоритм является итерационным (повторяющимся пока не выполнится условие); в последующем центроиды рассчитываются как среднее значение входящих в него объектов. Процесс повторных пересчетов размещения центроидов не заканчивается, пока дисперсия внутри кластера не станет минимально возможной при заданном количестве кластеров. Количество кластеров, равное 25, подбиралось экспертно. Вычисления проводились в сервисе Google Earth Engine, предоставляющем большие производительные мощности и широкий набор данных. Последующее вычисление пространственной статистики и картографирование материалов проводилось в программном комплексе QGIS версии 3.32. В результате были выделены 3 группы классов болот (табл. 1).

Таблица 1

Классы модели, полученной методом K-means

Тип классов	Группа классов	Класс	№ класса
Болота	Залесенные болота	Сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы)	1
		Рямово-мочажинные комплексы	2
		Древесные кустарничково-мохово-разнотравные болота (согры)	6
	Комплексные болота	Грядово-мочажинные комплексы	3
		Грядово-озерковые комплексы	4
	Открытые болота	Осоково-гипновые топи	7
		Травяно-сфагновые топи	5
	Растительность дренированных местоположений	Древесная растительность	Темнохвойный лес
Светлохвойный лес			10
Мелколиственный лес			11
Смешанный лес			12
Лугово-кустарниковая растительность		Луга и кустарники	13
Водные объекты			8
Открытый грунт, земли сельскохозяйственного назначения и селитебные территории			14

Приведенное выше выделение болотных классов растительности, вне принадлежности к региональным единицам, является принятым во многих работах (Лисс и др., 2001; Березин и др., 2014; Синюткина, 2012, 2017; Терентьева и др., 2020; Шинкаренко и др., 2024), в них же можно ознакомиться с их определением и описанием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения результатов картографирования болот была выбрана работа (Шинкаренко и др., 2024), так как в ней идентичными являются территория моделирования и составляющая легенды, относящаяся к болотным объектам. Авторская модель дешифрирования, полученная методом K-means, имеет размер 666 813 126 пикселей с пространственным разрешением 17x30 м (рис. 1А) по сравнению с 5 946 762 пикселями методом Random Forest с пространственным разрешением 230 м (рис. 1Б), имея, как следствие, большую детальность и дисперсную структуру (пространственное разрешение авторской модели выше в 103 раза).

При сопоставлении пространственного распределения структуры классов и групп классов видно высокое соответствие: 1) размещение «комплексных» болот преимущественно в северной и северо-западной части области; 2) группа «залесенных» болот преобладает на левобережье реки Томь; 3) «открытые» болота сопутствуют «комплексным» болотам, большей своей частью являясь их периферией; 4) юго-восточная часть области наименее заболоченная.

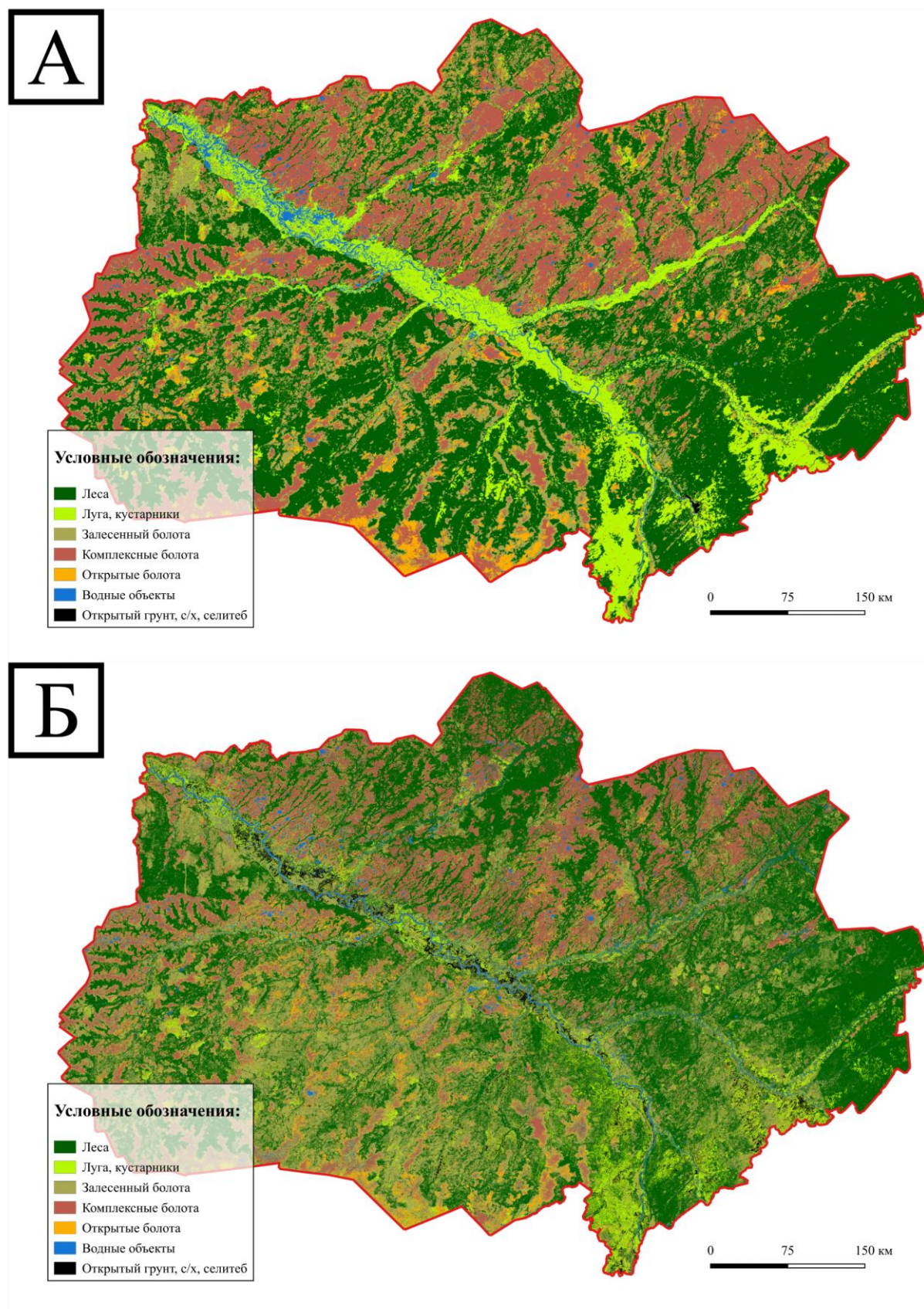


Рисунок 1. Дешифрирование объектов земной поверхности: А – согласно работе (Шинкаренко и др., 2024), Б – авторское дешифрирование.

Если же переходить к численному сопоставлению, то, согласно карте, представленной в работе (Шинкаренко и др., 2024), процент заболоченной территории субъекта равняется 44,3%, при площади Томской области в 314 391 км² («открытые» – 4,0%; «комплексные» – 20,0%; «залесенные» – 20,3%). По нашим предварительным оценкам, это значение соответствует 49,7% («открытые» – 6,0%; «комплексные» – 14,1%; «залесенные» – 29,6%). Разность оценок составляет 5,4% или около 17 000 км², что говорит о достаточно хорошей сходимости.

Рассматривая процентное соотношение между всеми классами, заметим, что картина становится несколько иной. Среднее значение расхождения составило 4,42%. Оценка группы классов «залесенных болот» разнится на 9,32%. Наша модель показывает следующие отличия: выше значения площадей «рямово-мочажинного комплекса» – 9,49% и «сосново-кустарничкового-сфагнового болота (ряма)» – 2,69%, ниже значения, занимаемые «древесного кустарничково-мохово-разнотравного болота (согры)» – 2,87%. При этом выше значения площадей «темнохвойного леса» на 7,17%, на 10,35% ниже значение для «смешанных лесов». Общее различие в оценке распространения лесов составляет 2,61% (рис. 2). Это можно трактовать как недоучет моделью (Шинкаренко и др., 2024) влагонасыщения объектов земной поверхности. В модели K-mean эта проблема решается использованием среди предикторов спектрального канала SWIR1, диапазон которого позволяет идентифицировать объекты по увлажненности, тем самым давая более точные оценки болот и лесов.

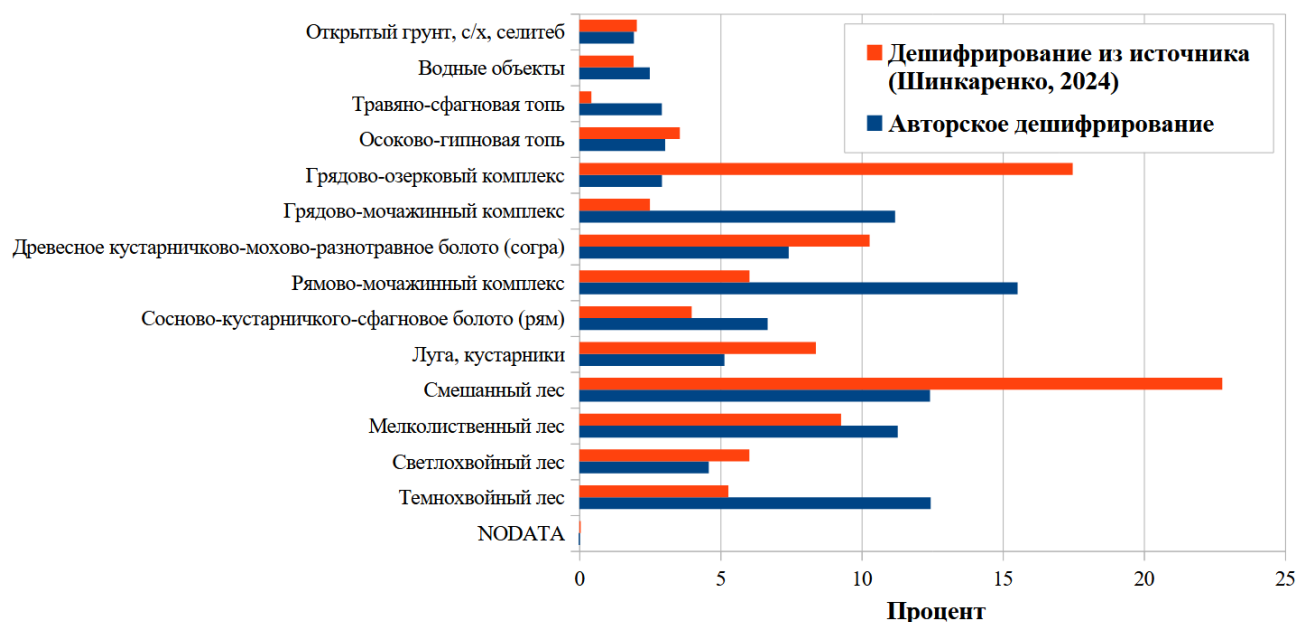


Рисунок 2. Процентное соотношение классов согласно работе (Шинкаренко и др., 2024) и авторского дешифрирования.

Высокие различия наблюдаются в «комплексных» болотных системах: на 8,68% выше значения, занимаемые «грядово-мочажинными комплексами», на 14,55% ниже площади «грядово-озерковых комплексов» (рис. 3Б); такая ситуация связана с комплексностью последнего класса. При дешифрировании ДДЗ3 высокого пространственного разрешения выделяются мелкие водные объекты, не объединяясь с классом «грядово-мочажинный комплекс». Также наблюдаются различия в оценке открытых объектов – «травяно-сфаговой топи» (значения выше на 2,49%) и «лугов и кустарников» (ниже значения на 3,24%). Можно сделать предположение, что в этих классах происходят обоюдно направленные ложно подтвержденные и отклоненные ошибки при их выделении; по остальным классам расхождения составляют менее 2% (рис. 2).

Верификация модели была проведена на основе визуальной оценки спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения. На (рис. 3А) видны различия в дешифрировании снимков с разным пространственным разрешением. В частности, можно отметить, что спутниковые данные MODIS плохо учитывают дисперсную, мозаичную структуру, которая, в том числе, наблюдается в пойменной части реки.

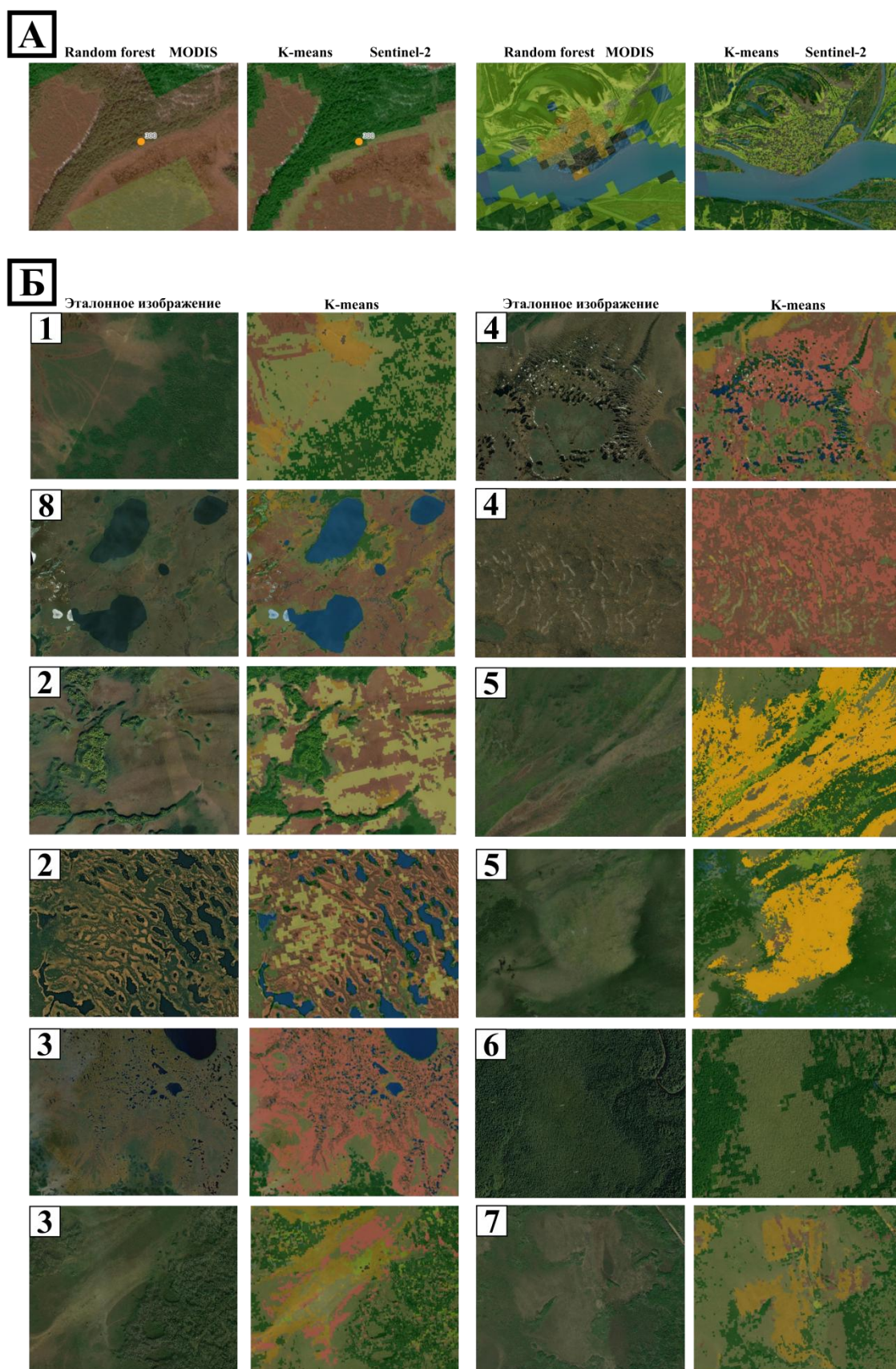


Рисунок 3. Примеры: А – точности дешифрирования в зависимости от пространственного разрешения спутниковых систем; Б – точности дешифрирования и пересечения болотных классов (ярким цветом выделен рассматриваемый класс (номер указан сверху слева) из группы классов (табл. 1), цвета смотреть в (рис. 1)). Если класс повторяется дважды, то сверху указан вариант с верно положительным дешифрированием, снизу с ложно положительным.

На (рис. 3Б) показаны ошибки авторской модели. Основные ошибки проявляются в перекликивании классов внутри групп. Также группа классов «залесенные болота» достаточно часто пересекается с группой классов «древесная растительность». Как справедливо отмечается в работе (Шинкаренко и др., 2024), большинство ошибок моделей при использовании в качестве предикторов спутниковых данных связано с комплексностью (Юрковская, 1968) и мелкоконтурностью болот.

Большую часть ошибок можно объяснить следующим: 1) некоторые классы пересекаются между собой (что можно исправить введением текстурных коэффициентов, подбором дополнительных предикторов); 2) комплексные классы требуют дополнительной обработки (состоят из комбинации полученных классов); при этом процент болот должен быть немногим больше, чем получился при текущем результате, так как в грядово-озерковый класс в некоторых случаях не включены водные объекты небольшой площади.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основным ограничением данной работы является рассмотрение достаточно малой территории. Несмотря на то, что даже при разных подходах к выбору ДДЗЗ и алгоритмов дешифрирования, получаются достаточно близкие оценки, но при масштабировании моделей появятся новые нюансы, которые необходимо будет учитывать (рассматривать новые предикторы и алгоритмы) для уменьшения ошибок дешифрирования. Так как основная пространственная дифференциация болот Западной Сибири прослеживается по природным зонам, при расширении территории моделирования в меридиональном направлении будут появляться новые типы болот. В частности, при изучении зоны тундр интересна работа К.И. Симоновой и Н.В. Цывкуновой (2024), результатом которой является рассмотрение зависимости экологической приуроченности озер от гидрохимических, морфометрических, геоботанических параметров и значений спектральных индексов, что во многом поможет при расширении классификационных единиц и будет полезно для их классификации по степени трофности.

Как справедливо отмечалось (Барталев и др., 2016), спутниковые данные MODIS являются подходящими при тематическом дешифрировании на национальном уровне; такая оценка является первичной для последующих детальных исследований с привлечением ДДЗЗ с более высокими пространственными и спектральными разрешениями, а также полевых данных (Синюткина, Гашкова, 2022). Дополнительная кластеризация в достоверно выделенных классах позволит проводить более детальное дешифрирование при условии, что подберется качественный временной ряд спутниковых снимков земной поверхности.

Отдельно встает вопрос о связи и последующем развитии таких исследований в области болотоведения, геоботаники и ландшафтоведения, так как даже высокая детальность спутниковой съемки не даст возможность рассматривать результаты дешифрирования с такой детальностью, какая принята в этих науках. Как один из вариантов можно рассматривать возможность совмещения в анализе моделей и карт растительности или геосистем. В частности, из «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» (Ильина и др., 1977) можно взять флористический состав контуров карты и совместить их ядра с дешифрированными контурами спутниковых снимков, чтобы увеличить детальность дешифрирования. Безусловно, такой подход имеет ряд недостатков: смена флористического состава в субдоминантах и сопутствующих видах, трансформация растительных ассоциаций и топологических геосистем. Однако использование карты позволит идентифицировать доминантные виды на контурах дешифрирования, что поможет проследить пространственную динамику. Резкие трансформации, такие как пожары и рубки, достаточно неплохо идентифицируются; исходя из общих представлений о сукцессионных рядах, при подобных нарушениях можно проследить динамику смены растительности. Оцифрованный вариант карты представлен в источнике (Растительность Западно-Сибирской равнины, М 1:1 500 000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода кластеризации K-means к данным дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) позволило выделить 14 объектов земной поверхности, объединённых в 7 групп, отражающих основные типы болот и зональной растительности, а также водные объекты и открытые грунты с антропогенными ландшафтами для территории Томской области. Полученная карта демонстрирует более высокую детализацию по сравнению с существующими аналогами, особенно в отношении комплексных болот, где традиционные методы склонны к укрупнению и усреднению. Общая площадь болот (156 252 км²), оценённая в 49,7%

территории области, несколько превышает ранее опубликованные данные, что подчёркивает важность использования данных высокого разрешения и современных алгоритмов кластеризации.

Полученные расхождения с данными (Шинкаренко и др., 2024), в частности завышение доли грядово-мочажинных комплексов на 8,68% и занижение грядово-озерковых на 14,55%, обусловлены использованием ДДЗЗ с высоким пространственным разрешением, что позволило выделять мелкие водные объекты, которые в составе комплексных болот не агрегируются в единый класс, а идентифицируются отдельно. Указанное свидетельствует о более высокой чувствительности данных к пространственной структуре болотных массивов. Выявлены и ограничения подхода: пересечение спектральных сигнатур отдельных классов, влияние широтной зональности на фенологические циклы и сложность интерпретации комплексных болотных угодий, состоящих из комбинации элементов; в последующем необходимо применить дополнительную обработку данных для устранения этих ошибок.

Таким образом, метод K-means является эффективным инструментом для тематического дешифрирования болот при наличии тщательно подобранных предикторов и последующей визуальной верификации. Для дальнейшего повышения точности классификации и устойчивости модели в пространстве и времени рекомендуется интеграция дополнительных данных: текстурных индексов, временных рядов, морфометрических параметров рельефа, а также полевых наблюдений и тематических карт. Такой комплексный подход позволит не только повысить достоверность карт болот, но и заложить основу для создания динамических моделей их трансформации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-17-00167, <https://rscf.ru/project/25-17-00167/>.

ЛИТЕРАТУРА

- Базанов В.А., Савичев О.Г., Скугарев А.А., Харанжевская Ю.А. Применение метода фитоиндикации в гидрологических исследованиях заболоченных территорий Западной Сибири (на примере р. Ключ, Томская область) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. № 4(8). С. 84–96.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. Москва: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Березин А.Е., Базанов В.А., Скугарев А.А., Рыбина Т.А., Паршина Н.В. Ландшафты Большого Васюганского болота // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.) / Под редакцией А.А. Титляновой и М.И. Дергачёвой. Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2014. С. 50–52.
- Ильина И.С., Лапшина Е.И., Махно В.Д., Романова Е.А. Принципы составления обзорной «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» // Геоботаническое картографирование. 1977. С. 41–57.
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
- Растительность Западно-Сибирской Равнины М1:1 500 000 [Электронный ресурс]: Каталог ресурсов. Геопортал ИВМ СО РАН. URL: <https://gis.krasn.ru/blog/catalog?call=search&resourceId=83b1f702-18fd-92bf-1c83-14c012406bbd> (дата обращения 05.04.2025).
- Симонова К.И., Цывкунова Н.В. Применение спектральных индексов для изучения экологических особенностей тундровых озёр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Том 21. № 5. С. 249–262. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262>
- Синюткина А.А. Классификация болотных геосистем Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 357. С. 192–194.
- Синюткина А.А. Ландшафтное картографирование болот Томской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 2. С. 21–28.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота // Региональные геосистемы. 2022. Том 46. № 3. С. 366–377. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377>
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.

Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Лапшина Е.Д., Смоленцев Б.А., Максютлов Ш. Новая карта болот южной тайги Западной Сибири для оценки эмиссии метана и диоксида углерода // Водные ресурсы. 2017. Том 44. № 2. С. 209–220. <https://doi.org/10.7868/S032105961702016X>

Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютлов Ш. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Том 84. № 6. С. 920–930 <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Сайгин И.А. Развитие методов картографирования болотных комплексов Западной Сибири на основе временных рядов данных дистанционного зондирования и машинного обучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Том 21. № 6. С. 200–212. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212>

Юрковская Т.К. О некоторых принципах построения легенды карты растительности болот // Геоботаническое картографирование. 1968. С. 44–51.

Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. 425 p.

Google Earth Engine [Электронный ресурс]: платформа для анализа пространственных данных. URL: <https://earthengine.google.com> (дата обращения 05.04.2025).

Montero Loaiza D. List of Spectral Indices [Электронный ресурс]. Awesome-ee-spectral-indices documentation. 2021. URL: <https://awesome-ee-spectral-indices.readthedocs.io/en/latest/list.html> (дата обращения 05.04.2025).

Поступила в редакцию 31.07.2025

Принята 02.09.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Голубец Дмитрий Игоревич – инженер лаборатории физической географии и биогеографии ФГБУН Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН (г. Иркутск, Россия); ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ФГБНУ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (г. Новосибирск, Россия); dima.golubets1203@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3217-7866>

Дюкарев Егор Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории климато-экологических исследований ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ФГБУ ВО «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск, Россия); egor@imces.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Mapping of mires of the Tomsk region by the clustering method

© 2025 D. I. Golubets ^{1, 2, 3}, E. A. Dyukarev ^{2, 4}

¹*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya, 12, Irkutsk, Russia. E-mail: dima.golubets1203@gmail.com*

²*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskii prospect, 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: egor@imces.ru*

³*Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Academician Lavrentyev Avenue, 6, Novosibirsk, Russia*

⁴*Yugra State University, str. Chekhova, 16, Khanty-Mansiysk, Russia*

The aim of the study was thematic classification of mire ecosystems in Tomsk Region using Sentinel-2 Earth observation data and the K-means clustering method to improve the accuracy of area estimation and identify

local spatial distribution patterns of mires. Spectral bands (2, 3, 4, 8A, 11) and indices (NDVI, NDWI, NDBI) from April to September 2024 were used as predictors and processed in Google Earth Engine. Cartographic visualization was performed in QGIS. Fourteen clusters were identified and grouped into seven classes: forested, open, and complex mires, woody and meadow-shrub vegetation, water bodies and bare soil. The total mire area was estimated as 49.7% of the region's territory, exceeding previous estimates by 5.4%. The largest discrepancies were observed for forested mires (+9,32%) and complex mires (–5,87%); these discrepancies can be attributed to the high spatial resolution and optimized set of predictors, including the SWIR band for moisture detection. The results confirm the effectiveness of unsupervised classification for delineating homogeneous mire ecosystems. To further improve accuracy, integration of field data, time series, and additional predictors such as texture and morphometric parameters is recommended.

Keywords: remote sensing of the Earth; mires; thematic classification.

How to cite: Golubets D.I., Dyukarev E.A. Mapping of mires of the Tomsk region by the clustering method. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8. No. 4. e323. DOI: [10.31251/pos.v8i4.323](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323) (in Russian with English abstract)

FUNDING

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant № 25-17-00167, <https://rscf.ru/en/project/25-17-00167/>.

REFERENCES

- Bazanov V.A., Savichev O.G., Skugarev A.A., Kharanzhevskaya Yu.A. Application of method phitoindication in hydrological researches of boggy territories of the Western Siberia (by the example of the small river Kluch, Tomsk area). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2009. No. 4(8). P. 84–96. (in Russian).
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Satellite Mapping of Vegetation Cover of Russia. Moscow: IKI RAS, 2016. 208 p. (in Russian).
- Berezin A.E., Bazanov V.A., Skugarev A.A., Rybina T.A., Parshina N.V. Landscapes of the Great Vasyugan Mire. In book: *Peatlands of Western Siberia and the Carbon Cycle: Past and Present. Materials of the 4th International Field Symposium (Novosibirsk, 4–17 August, 2014)* / Edited by A.A. Titlyanova and M.I. Dergacheva. Novosibirsk: National Research Tomsk State University, 2014. P. 50–52. (in Russian).
- Iljina I.S., Lapshina E.I., Makhno V.D., Romanova E.A. Principles of compiling of the survey «Vegetation map of West Siberian plain». *Geobotanical Mapping*. 1977. P. 41–58. (in Russian).
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. Swamp systems of Western Siberia and their environmental significance. Tula: Grif and K, 2001. 584 p. (in Russian).
- Vegetation of the West Siberian Plain Scale 1:1 500 000 [Electronic resource]: Resource Catalog. Geoportal of the Institute of Numerical Mathematics SB RAS. URL: <https://gis.krasn.ru/blog/catalog?call=search&resourceId=83b1f702-18fd-92bf-1c83-14c012406bbd> (accessed on 05.04.2025). (in Russian).
- Simonova K.I., Tsivkunova N.V. Investigation of tundra lakes' ecological features by applying spectral indices. *Sovremennye Problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. Vol. 21. No. 5, H. 249–262. (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262>
- Sinyutkina A.A. Mire geosystem classification of Tomsk region. *Tomsk State University Journal*. 2012. No. 357. P. 192–194. (in Russian).
- Sinyutkina A.A. Landscape mapping of bogs in the Tomsk region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2017. No. 2. P. 21–28. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. State assessing and gis modeling of the post-pyrogeic dynamics of the Great Vasyugan mire site. *Regional Geosystems*. 2022. Vol. 46. No. 3. P. 366–377. (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377>
- Sochava V.B. Introduction to the Study of Geosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 318 p. (in Russian).
- Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S. A New map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide. *Water Resources*. 2017. Vol. 44. No 2. P. 297–307. <https://doi.org/10.1134/S0097807817020154>
- Terent'eva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh. Western Siberia's taiga wetlands mapping based on remote sensing data. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2020. Vol. 84. No. 6. P. 920–930. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Saigin I.A. Development of mapping methods for wetland complexes in Western Siberia based on time series of remote sensing data and machine learning. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. Vol. 21. No. 6. P. 200–212. (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212>

Yurkovskaja T.K. Some principles of compilation of a bog vegetation map. *Geobotanical Mapping*. 1968. P. 44–51. (in Russian).

Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. 425 p.

Google Earth Engine [Electronic resource]: a platform for spatial data analysis. URL: <https://earthengine.google.com> (accessed on 05.04.2025).

Montero Loaiza D. List of Spectral Indices [Electronic resource]. Awesome-ee-spectral-indices documentation. 2021. URL: <https://awesome-ee-spectral-indices.readthedocs.io/en/latest/list.html> (accessed on 05.04.2025).

Received 31 July 2025

Accepted 02 September 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Dmitry I. Golubets – Engineer, Laboratory of Physical Geography and Biogeography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia); Laboratory of Climate and Environmental Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia.); Laboratory of Regional Monitoring Problems, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russia); dima.golubets1203@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3217-7866>

Egor A. Dyukarev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Climate Systems Physics, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); UNESCO Research Center Environmental Dynamics and Global Climate Change, Yugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia); egor@imces.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)