

Развитие методов картографирования болотных комплексов Западной Сибири на основе временных рядов данных дистанционного зондирования и машинного обучения

С. С. Шинкаренко¹, С. А. Барталев¹, Е. А. Дюкарев^{2,3},
Е. А. Головацкая², И. А. Сайгин¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

² *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН*
Томск, 634055, Россия

³ *Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, 628012, Россия*

Представлены результаты картографирования типов болотных комплексов Томской области на основе очищенных от влияния облаков временных рядов ежедневных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) спутниковой системы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), сформированных с их использованием композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова и применением ансамблевого метода машинного обучения Random Forest. Также в качестве признаков использовались цифровые модели рельефа и местности GTOPO30, ASTER GDEM (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) и FABDEM (*англ.* Forest And Buildings removed Copernicus Digital Elevation Model). Разработанная типология болот включает три типа болотных микроландшафтов с древесным ярусом (сосново-кустарничково-сфагновое болото — рям, рямово-мочажинный комплекс, древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото — согра), один комплексный (грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы), два открытых (травяно-сфагновая топь, осоково-гипновое болото) и внутриболотные озёра. Общая точность классификации составила 0,96, для отдельных типов болотных комплексов полнота их выделения варьирует в диапазоне от 0,66 до 0,99. Всего в Томской области болотные комплексы идентифицированы на площади 13,7 млн га, в том числе 9,4 млн га из них преимущественно открытые. Эта оценка хорошо согласуется со статистическими данными о площади болот региона, составляющей 9,2 млн га. Показана высокая информативность при классификации типов болотных комплексов цифровых моделей рельефа различного пространственного разрешения, данных ДЗЗ в периоды наличия и схода снежного покрова, начала и окончания вегетации растительности.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, болота, Западная Сибирь, MODIS, машинное обучение

Одобрена к печати: 29.10.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212

Введение

Торфяные болота выполняют важную климаторегулирующую функцию, аккумулируя значительные запасы органического углерода, являясь при этом одним из основных источников метана. Существенные отличия потоков метана из почв разных болотных экосистем (Golovatskaya et al., 2024) требуют для достоверной оценки их состояния и параметров цикла углерода актуальной картографической информации (Терентьева и др., 2020; Юрковская, 1988). Существующие глобальные карты болот и водно-болотных угодий не обеспечивают достаточную для изучения параметров цикла углерода точность и тематическую детальность (Шинкаренко, Барталев, 2023). Это приводит к существенным различиям имеющихся оценок площади торфяных болот на основе разных данных. По информации С. Э. Вомперского с соавторами (2005), в России около 369 млн га заболоченных земель, в том числе 139 млн га

болот с мощностью торфяной залежи более 30 см, из которых 118,5 млн га расположены в азиатской части страны. Лесной покров присутствует примерно на 38 % площади болот, из которых 21 % представлен рединами, а лесом являются 17 %. Около половины заболоченных мелкоотторфованных земель также в разной степени покрыты лесом (Vompersky et al., 2011). Согласно почвенно-географической базе данных России (<https://soil-db.ru/>) в стране 154 млн га болот без учёта расположенных на лесных землях торфяников. В глобальной базе данных торфяников (<https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html>) приводится оценка в 456 млн га органических почв в России (к органическим относятся почвы с содержанием органического вещества не менее 12 % независимо от мощности горизонта, в том числе торфяники и заболоченные мелкоотторфованные участки). Согласно разработанным Институтом космических исследований (ИКИ) РАН спутниковым картам типов наземных экосистем (Барталев и др., 2016) в России к открытым в различной степени болотам может быть отнесена территория площадью от 70 до 200 млн га по состоянию на период 2001–2023 гг.

Подобные неопределённости в оценках площадей болот связаны с достаточно мелким масштабом используемых почвенных карт, комплексностью и фрагментарностью болотных ландшафтов, а также наличием древесного яруса, из-за чего часть болот учитывается в статистике как покрытые лесом земли. Недооценка площади болот по почвенным картам из-за их устаревания и недостаточной детальности в Северном полушарии достигает 25 % (Hugelius et al., 2020). Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса для картографирования болот потенциально позволяет получить значительно более точные результаты по сравнению с мелкомасштабными почвенными и другими тематическими картами (Minasny et al., 2019).

Достаточно широко при картографировании болот применяется экспертное дешифрирование спутниковых изображений высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (Ильясов и др., 2019; Синюткина, 2017; Сирин и др., 2014). Это может быть оправдано, так как болотные массивы достаточно стабильны, а их структура чётко отображается на спутниковых изображениях (Усова, 2009). Однако картографирование болотных экосистем с развитым древесным, кустарничковым или травяным ярусом на основе визуальной интерпретации может быть затруднено из-за сходства с лесами, лугами и тундрами, расположенными за пределами территории болот. Также экспертное дешифрирование очень трудоёмко, что диктует необходимость применения для создания регулярно обновляемых карт болот на территории России методов автоматизированного картографирования (Шинкаренко, Барталев, 2023). Тем не менее результаты визуального дешифрирования отдельных болотных комплексов могут успешно использоваться для создания опорной выборки (Karlson, Bastviken, 2022), так как сбор достаточного объёма наземной информации о состоянии болот ограничен их труднодоступностью (Терентьева и др., 2020). Картографирование типов болот на основе автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования в России в настоящее время носит ограниченный характер, охватывая отдельные регионы страны (Медведева и др., 2019; Dyukarev et al., 2017; Terent'eva et al., 2017).

Цель настоящей работы состоит в исследовании возможностей картографирования типов болот на основе временных рядов спутниковых данных ДЗЗ среднего пространственного разрешения и методов машинного обучения на примере Томской области. Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- разработка типологии болотных комплексов Томской области с возможностью дальнейшего расширения на территорию Западной Сибири и всей России;
- формирование опорной выборки на основе наземной информации и экспертного дешифрирования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения;
- классификация ежедневных рядов спутниковых данных ДЗЗ с оценкой точности результатов;
- создание обновлённой карты наземных экосистем Томской области с расширенной легендой болот.

Материалы и методы исследования

Разработка карты болотных комплексов основана на классификации временных рядов ежедневных данных коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) земной поверхности, полученных по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Миклашевич и др., 2019) с пространственным разрешением 230 м и устранённым влиянием облачности. При этом использовались данные, полученные в 2021 г. в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, а также значения нормализованного разностного вегетационного индекса (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и композитное изображение земной поверхности с наличием снежного покрова. Классификация выполнялась с использованием непараметрического алгоритма случайного леса (*англ.* Random Forest), реализованного на языке Python (Барталев, Хвостиков, 2023). Выбор спутниковых данных MODIS обусловлен высоким временным разрешением и достаточным пространственным разрешением для дальнейшей разработки карт болотных комплексов на национальном уровне (Шинкаренко, Барталев, 2023; Artz et al., 2019; Pflugmacher et al., 2007). Территория исследований охватывается четырьмя гранулами MODIS: h21v02, h21v03, h22v02, h22v03. Также в качестве признака применялись глобальные цифровые модели местности GTOPO30 разрешения 30" (<https://rda.ucar.edu/datasets/d758000>), ASTER GDEM (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) и FABDEM (*англ.* Forest And Buildings removed Copernicus Digital Elevation Model) разрешения 30 м. Обработка спутниковых данных выполнена с использованием сервиса «Beta-Science» (Lourian et al., 2022) и ресурсов центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Опорная информация получена экспертным дешифрированием данных Sentinel-2 за 2021 г. с дополнительным контролем по высокодетальным спутниковым изображениям из открытых источников и данным наземных исследований. Типология болотных комплексов разработана на основе общепринятых классификаций болот (Евсеева и др., 2012; Ильина и др., 1977; Лисс, Березина, 1981; Романова и др., 1977; Терентьева и др., 2020; Юрковская, 1988; Dyukarev et al., 2017; Terent'eva et al., 2017) и включает три типа болотных микроландшафтов с древесным ярусом (сосново-кустарничково-сфагновое болото — рям, рямово-мочажинный комплекс, древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото — согра), один комплексный (грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы), два открытых (травяно-сфагновая топь, осоково-гипновое болото) и внутриболотные озёра (*табл. 1*).

Таблица 1. Типы болотных экосистем, включённые в классификацию

№	Тип	Стадия	Группа	Количество пикселей
1	Сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям)	Олиготрофная	Древесная	977
2	Рямово-мочажинный комплекс	Олиготрофная	Древесная	807
3	Грядово-мочажинный комплекс	Олиготрофная	Древесно-травяная	5790
4	Травяно-сфагновая топь	Олиготрофная, мезотрофная	Травяная	542
5	Древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото (согра)	Эвтрофная	Древесная	3534
6	Осоково-гипновое болото	Эвтрофная	Травяная	5473
7	Внутриболотные озёра	—	—	6029

Сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям) — олиготрофное болото с древесным ярусом сосны на периферии болот, склонах болот, дренированных участках, выпуклых внутриболотных островах. Лесные микроландшафты характеризуются хорошо развитым древес-

ным ярусом. Сомкнутость крон деревьев 0,5–0,8, высота деревьев 2–6 м. Травяно-кустарничковый ярус представлен в основном кустарничками (багульник, кассандра, брусника, черника), из трав местами встречаются пушица и осока. Моховой ярус состоит в основном из сфагновых мхов. Рямы встречаются на окраинах болот, вдоль рек и ручьёв, вокруг крупных озёр. В зависимости от высоты и сомкнутости древостоев рямы может быть разделён на рослый (высота древостоя до 15–18 м) и низкий (Лисс, Березина, 1981).

Рямово-мочажинный комплекс — олиготрофное болото, аналогичное рямам по составу древесной растительности, но с разреженным древостоем с небольшими травяно-сфагновыми мочажинами. Приурочены к склонам и окраинам болот. Также к этому классу отнесены сосново-пушицево-сфагновые болота. Древесный ярус несколько угнетён по сравнению с лесными микроландшафтами. Сомкнутость крон деревьев порядка 0,3–0,4, высота деревьев 1–5 м, отдельных — до 5–6 м. Кустарничковый ярус хорошо развит и представлен в основном багульником, кассандрой, подбелом, брусникой и клюквой. Моховой ярус образован сфагновыми мхами, местами с примесью лишайников и зелёных мхов.

Древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото (согра) — эвтрофное сосново-елово-кедрово-берёзовое, берёзово-травяное и ивово-осоковое лесные болота в поймах и на террасах рек.

Грядово-мочажинный и грядово-мочажинно-озерковый комплекс — олиготрофное или мезотрофное древесно-травяное, кустарничково-моховое или травяно-моховое болото, включающее чередующиеся участки приподнятых элементов микрорельефа (гряды) с сосной, кустарничками и пониженных элементов (мочажины) с травами и мхами, ориентированной или беспорядочной структуры. Возможно разделение на крупно-, средне- и мелкомочажинный тип. Расположены в центральной части водораздельных болотных массивов и вдоль линий стекания. На грядово-мочажинно-озерковых комплексах гряды и мочажины чередуются с участками открытой воды. Возможны гряды с сосной или без древесного яруса. Крупные внутриболотные озёра попадают в отдельный класс водных объектов.

Травяно-сфагновая топь — олиготрофная или мезотрофная обводнённая осоково-пушицево-шейхцериево-разнотравно-сфагновая топь, тянущаяся вдоль линий стекания с болот, по периферии болотных массивов и внутриболотных островов, в центральной части водораздельных болот, встречается в прибереговой полосе вблизи крупных озёр. Древесный ярус почти не развит, попадаются местами отдельные низкорослые деревья с сухостоем.

Осоково-гипновое болото — эвтрофное открытое травяно-моховое пойменное болото, террасное болото и южные отроги Васюганского болота в Северобарабинском округе подтаёжных эвтрофных болот.

Указанные типы болотных комплексов характеризуются чёткими дешифровочными признаками: наличием древесного яруса различной сомкнутости, водной поверхности, геометрическими и структурными признаками, поэтому достаточно надёжно идентифицируются по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (Усова, 2009). Для отделения болотных комплексов от незаболоченных лесов и лугов в выборку были также включены участки, которые расположены за пределами территории болот: темнохвойные и светлехвойные вечнозелёные леса, лиственные и смешанные леса, лиственные кустарники, луга и прибрежная растительность.

Распределение полигонов опорной выборки показано на *рис. 1* (см. с. 204). Всего в исследовании использовалось около 1,5 тыс. опорных полигонов общей площадью 380 тыс. га (71 тыс. пикселей MODIS), в том числе 90 тыс. га болотных экосистем. Для обучения алгоритма было взято 70 % выборки, остальные 30 % не участвовали в обучении, а применялись для оценки точности полученных результатов. В качестве метрик при оценке точности использовались матрица перепутывания (*англ.* Confusion matrix) и рассчитываемые на её основе характеристики: полнота (*англ.* Recall; точность производителя, доля правильно определённых пикселей целевого класса), точность (*англ.* Precision; точность пользователя, доля правильно определённых пикселей, которые не принадлежат к целевому классу), F1 — частное от удвоенного произведения точности на полноту и их суммы, а также общая точность — доля правильно определённых пикселей всех классов.

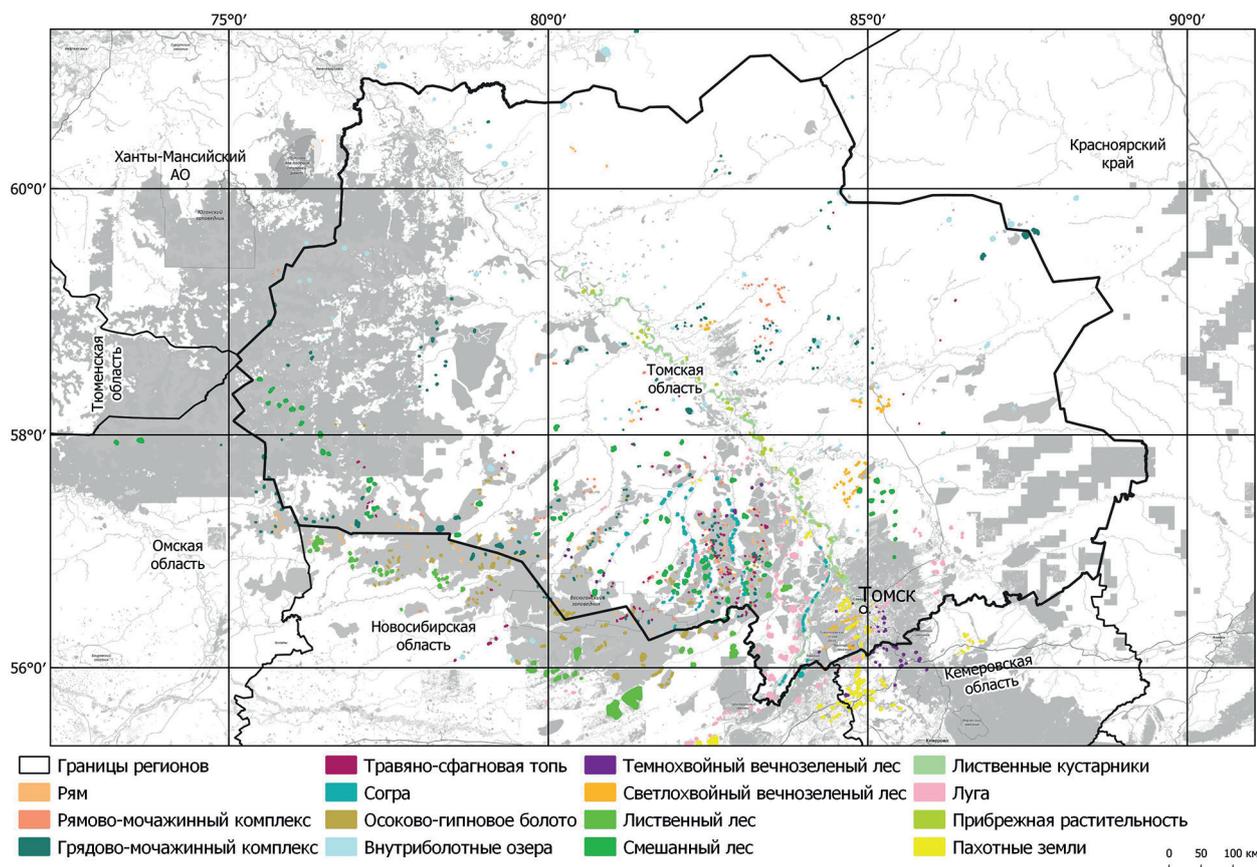


Рис. 1. Расположение полигонов опорной выборки (базовая карта — OSM (англ. Open Street Map, <https://www.openstreetmap.org/>))

Результаты и обсуждение

В результате использования алгоритма Random Forest и спутниковых данных MODIS получена модель, общая точность которой составляет 0,96 (табл. 2). Наиболее полно идентифицируются внутриболотные озёра, грядово-мочажинные комплексы, согры и осоково-гипновые болота. Около трети площадей травяно-сфагновых топей оказалось пропущено, что связано с ошибочным отнесением их к осоково-гипновым болотам. Для рямово-мочажинных комплексов характерна относительно высокая доля ложных определений (17 %), что связано с перепутыванием их с грядово-мочажинными комплексами. Определяющий вес при классификации болотных комплексов имеют высотные отметки по данным цифровой модели рельефа GTOPO30 и КСЯ красного и ближнего инфракрасного диапазонов в зимний период при наличии снежного покрова, а также в мае, июне и сентябре (рис. 2, см. с. 205). Зимнее композитное изображение очень важно для картографирования сосново-кустарничково-сфагновых болот (рямов) и особенно рямово-мочажинных комплексов. Исключение зимних данных из признаков снижает полноту определения рямов до 0,74, а рямово-мочажинных комплексов — до 0,76. Добавление в качестве признаков данных NDVI позволяет несколько увеличить полноту идентификации травяно-сфагновых топей, до 0,69, но при этом оказывается пропущенной часть сосново-кустарничково-сфагновых болот (рямов) и рямово-мочажинных комплексов (полнота 0,76 и 0,80 соответственно). Поэтому использование NDVI при картографировании болот не даёт преимуществ в сравнении с КСЯ. Применение цифровых моделей рельефа более высокого пространственного разрешения, чем GTOPO30 (ASTER GDEM, FABDEM), не позволило существенно повысить точность картографирования болотных комплексов исследуемого региона.

Таблица 2. Метрики точности обучения алгоритма Random Forest на болотных комплексах при использовании ежедневных данных, зимнего изображения MODIS и GTOPO30

Тип	Точность	Полнота	F1	Площадь, млн га
Сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям)	0,91	0,78	0,84	1,03
Рямово-мочажинный комплекс	0,83	0,83	0,83	1,90
Грядово-мочажинный комплекс	0,97	0,98	0,97	6,29
Травяно-сфагновая топь	0,96	0,66	0,78	0,13
Древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото (согра)	0,95	0,93	0,94	3,24
Осоково-гипновое болото	0,96	0,99	0,97	1,12
Внутриболотные озёра	0,99	0,99	0,99	—
Общая точность	0,96			—

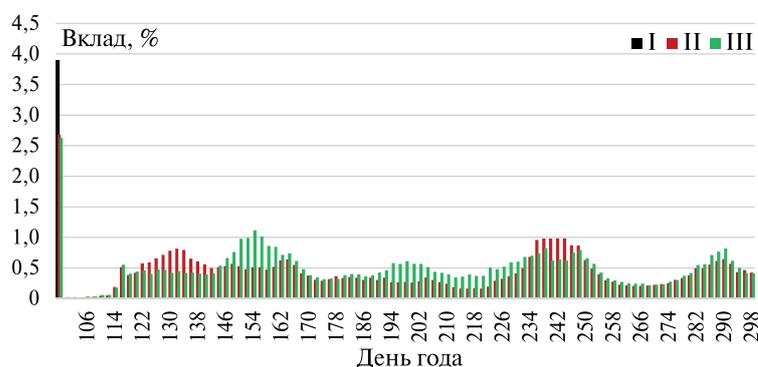


Рис. 2. Вклад признаков при классификации типов болот Томской области. I — цифровая модель местности GTOPO30, II — КСЯ в красном канале, III — КСЯ в ближнем инфракрасном канале

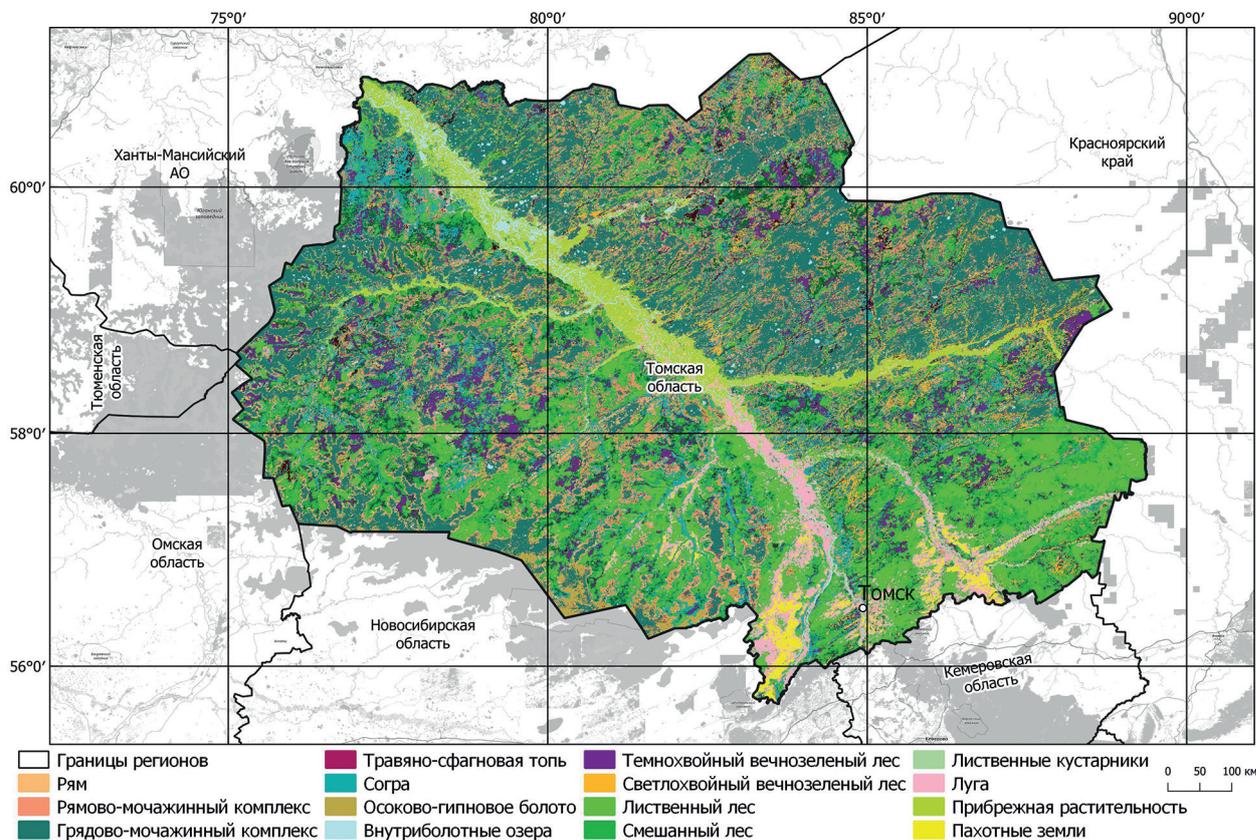


Рис. 3. Результат картографирования болотных комплексов Томской области

Всего в Томской области идентифицировано 13,7 млн га болот (рис. 3 (см. с. 205), 4), среди которых преобладающими являются грядово-мочажинные комплексы (около 46 % всех болот). Покрытые лесом болота (рямы и согры) занимают 4,3 млн га. Площадь открытых болот и рямово-мочажинных комплексов составляет 9,4 млн га. К олиготрофным болотам могут быть отнесены 9,22 млн га, к эвтрофным — 4,36 млн га. Мезотрофный тип представлен травяно-сфагновыми топиями, которые занимают около 0,13 млн га. Этот класс болот характеризуется наименьшей полнотой (0,66) из-за перепутывания с осоково-гипновыми болотами, поэтому доля травяно-сфагновых топей может быть несколько больше.

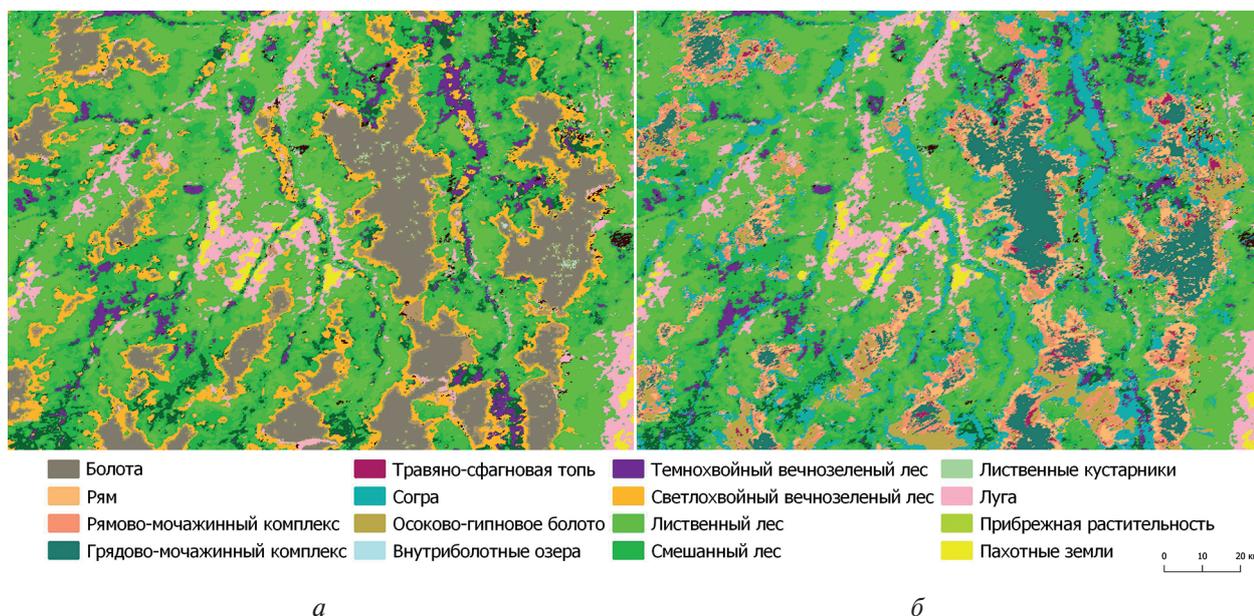


Рис. 4. Сравнение карт типов земного покрова на примере Бакчарского болота: а — текущая версия карты ИКИ РАН; б — версия карты с расширенной легендой болот

По данным лесоустройства в регионе 8,7 млн га болот. Согласно Почвенно-географической базе данных России (<https://soil-db.ru/>) в Томской области 9,2 млн га болот за пределами лесных земель. Полученные оценки по открытым болотам на основе классификации спутниковых данных соответствуют указанным статистическим сведениям и на уровне муниципальных районов (коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$), если не учитывать покрытые лесом сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы) и согры (рис. 5, см. с. 207). По картам типов земного покрова ИКИ РАН за 2001–2022 гг. в границах Томской области в зависимости от количества наблюдений в каждом пикселе зафиксировано от 6,2 («стабильные» болота, отмечаемые ежегодно) до 8,1 млн га болот (имеется хотя бы одно наблюдение болот за 2001–2022 гг.). При этом значительная часть болот с древесным ярусом на картах типов земного покрова ИКИ РАН относится к соответствующему типу лесов. Согласно карте ИКИ РАН до 70 % сосново-кустарничково-сфагновых болот (рямов) отнесено к светлохвойным вечнозелёным лесам и около 90 % древесных кустарничково-мохово-разнотравных болот (согры) — к смешанным лесам. Наличие древесного яруса является одной из основных причин неопределённостей, возникающих при картографировании болот по данным дистанционного зондирования. Включение в обучающую выборку лесов, которые расположены за пределами территории болот, позволяет несколько повысить точность картографирования болотных комплексов с древесным ярусом, в первую очередь с сосной. При использовании обучающей выборки только с болотными классами полнота картографирования рямов и рямово-мочажинных комплексов составляет 0,77 и 0,79 соответственно, в то время как расширение выборки лесами за пределами территории болот увеличивает полноту для этих классов до 0,78 и 0,83 соответственно.

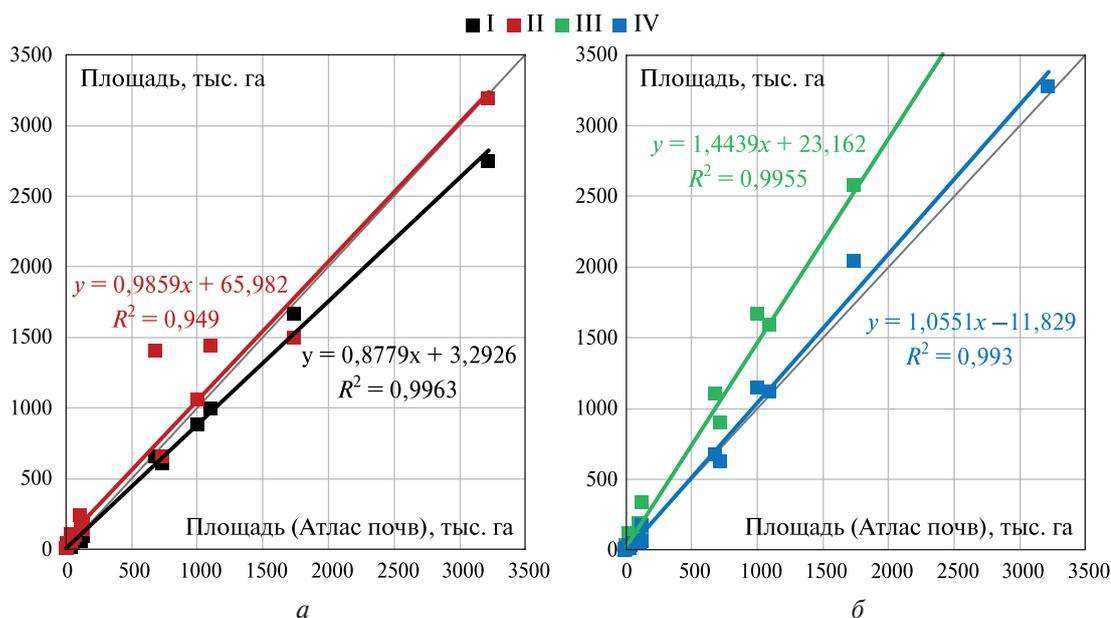


Рис. 5. Сопоставление площади болот в муниципальных районах Томской области по данным Почвенно-географической базы данных России и карты типов земного покрова ИКИ РАН (а, I), карты PeatMap (а, II), полученной карты болот с учётом (б, III) и без учёта (б, IV) облесённых болот

В Томской области при геологических изысканиях выявлено и учтено 7,72 млн га торфяных месторождений с промышленной глубиной залежи торфа, среди которых преобладают залежи верхового (олиготрофного) типа (57%), низинные (эвтрофные) и переходные (мезотрофные) занимают примерно по 19–20% торфяников (Инишева и др., 1995). Согласно данным карт торфяных месторождений Западной Сибири (Карта..., 1971; Карта..., 2000) М 1:1 000 000, приведённым в виде электронных карт PeatMap (Xu et al., 2018), в Томской области 10,4 млн га торфяников, в том числе около 5,1 млн га верховых, 2,3 млн га низинных и 3,0 млн га смешанных и переходных (Sheng et al., 2004). При этом на этих картах не учитываются небольшие торфяники площадью до нескольких тысяч гектаров, которые количественно преобладают в регионе (Инишева и др., 1995), поэтому реальная площадь торфяников и мелкоотторфованных территорий может быть существенно больше. По данным карты торфяников (гистосолей) в Томской области 8,1 млн га относятся к этим типам почв (Hugelius et al., 2020). В Глобальной базе данных торфяников (<https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html>) для Томской области указано 16,6 млн га территорий с органическими почвами (содержание органического вещества более 12%).

Согласно глобальной карте торфяников PeatML (Melton et al., 2022) в Томской области расположено 9,5 млн га торфяников, что соответствует полученным оценкам для открытых болот. Эта карта разработана на основе методов машинного обучения, а в качестве признаков использовались: климатические характеристики, информация о почвенном покрове и рельефе, оптические и радарные спутниковые данные, в том числе вегетационные индексы и информационные продукты их тематической обработки. При этом наибольший вклад в идентификацию торфяников внесли характеристики рельефа и содержание органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы.

Заключение

Оценки площадей болот в мире, в России и её отдельных регионах очень сильно различаются. Причиной этого являются устаревшие почвенные карты мелкого масштаба, которые используются при выделении торфяников, а также неопределённости при картографировании по данным дистанционного зондирования, связанные с комплексностью, мелкоконтур-

ностью болот и наличием древесного яруса. В результате проведённого исследования установлено, что использование ежедневных временных рядов спутниковых наблюдений MODIS и ансамблевого метода машинного обучения Random Forest позволяет успешно картографировать типы болотных комплексов южно-таёжной зоны Западной Сибири. Опорная информация может быть получена на основе выборочных наземных наблюдений и экспертного дешифрирования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения.

Включение в опорную выборку участков, которые расположены за пределами территории болот, повышает точность картографирования болотных комплексов. Ключевыми признаками для классификации болот являются цифровая модель местности (практически независимо от пространственного разрешения), зимнее композитное изображение при наличии снежного покрова и коэффициенты спектральной яркости в период схода снега, начала и окончания вегетации. Полученная площадь открытых болот Томской области (9,4 млн га) соответствует статистическим данным (9,2 млн га), в том числе и на уровне муниципальных районов ($R^2 = 0,99$).

Дальнейшее развитие методов картографирования болотных комплексов на основе временных рядов спутниковых данных и методов машинного обучения должно состоять в оптимизации признаков, использовании других алгоритмов, что может позволить увеличить точность классификации и сократить временные затраты на обучение моделей. Также возможно дальнейшее повышение тематической детальности карты болотных комплексов за счёт разделения грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов, выделения крупно-, средне- и мелкопочажинных типов, а также расширения региона исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ: соглашение в ГИИС «Электронный бюджет» № 075-15-2022-1229 «Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий. HPC and BigData applied to codesigning cost-efficient automation for large scale wetland biomonitoring».

Литература

1. *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. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Барталев С. А., Хвостиков С. А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666251 Российская Федерация. FORS-MachLearn № 2023664950. Заявл. 14.07.2023. Опубл. 27.07.2023. ИКИ РАН.
3. *Вомперский С. Э., Сирин А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А., Майков Д. А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 39–50.
4. *Евсеева Н. С., Синюткина А. А., Харанжевская Ю. А., Воистинова Е. С., Ромашова Т. В., Хромых В. В., Земцов В. А., Сорокин И. Б., Гузова Е. Н., Сиротина Е. А., Жилина Т. Н., Квасникова З. Н., Хромых О. В., Хромых В. С.* Ландшафты болот Томской области. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. 399 с.
5. *Ильина И. С., Лапина Е. И., Махно В. Д., Романова Е. А.* Принципы составления обзорной «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» // Геоботаническое картографирование. 1977. № 1977. С. 41–58. DOI: 10.31111/geobotmap/1977.41.
6. *Ильясов Д. В., Сирин А. А., Макарова Л. Ю., Букин А. В., Кораблина Н. Е.* ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно измененных торфяников Рязанской области // Вестн. Рязанского гос. агротехнол. ун-та им. П. А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 30–38.
7. *Инишева Л. И., Архипов В. С., Маслов С. Г., Михантьева Л. С.* Торфяные ресурсы Томской области и их использование. Новосибирск: СО РАСХН, 1995. 88 с.
8. Карта торфяных месторождений Западно-Сибирской равнины масштаба 1:1 000 000 / отв. ред. В. Д. Марков. М.: Трест «Геолторфразведка», 1971.
9. Карта торфяных месторождений Западной Сибири масштаба 1:1 000 000: Объяснительная записка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «ГЕО», 2000. 33 с.
10. *Лисс О. Л., Березина Н. А.* Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 205 с.

11. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
12. *Медведева М. А., Возбранная А. Е., Сиринов А. А., Маслов А. А.* Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 150–159. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
13. *Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е.* Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
14. *Романова Е. А., Быбина Р. Т., Голицина Е. Ф., Иванова Г. М., Усова Л. И., Трушников Л. Г.* Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Л.: ГУГК, 1977. 500 с.
15. *Синюткина А. А.* Ландшафтное картографирование болот Томской области // *Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология*. 2017. № 2. С. 21–28.
16. *Сиринов А. А., Маслов А. А., Валяева Н. А., Цыганова О. П., Глухова Т. В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // *Лесоведение*. 2014. № 5. С. 65–71.
17. *Терентьева И. Е., Филиппов И. В., Сабреков А. Ф. и др.* Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930. DOI: 10.31857/S2587556620060102.
18. *Усова Л. И.* Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. СПб.: Нестор-История, 2009. 80 с.
19. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Применение данных дистанционного зондирования для широкомасштабного мониторинга водно-болотных угодий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. С. 9–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
20. *Юрковская Т. Г.* Картографирование растительности болотных систем // *Геоботаническое картографирование*. 1988. С. 13–28. DOI: 10.31111/geobotmap/1988.13.
21. *Artz R. R. E., Johnson S., Bruneau P. et al.* The potential for modelling peatland habitat condition in Scotland using long-term MODIS data // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 660. P. 429–442. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.327.
22. *Dyukarev E. A., Alekseeva M. N., Golovatskaya E. A.* Study of wetland ecosystem vegetation using satellite data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. P. 1029–1041. DOI: 10.1134/S0001433817090092.
23. *Golovatskaya E. A., Veretennikova E. E., Dyukarev E. A.* Greenhouse gas fluxes and carbon sequestration in the oligotrophic peat soils of southern taiga in Western Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2024. V. 57. No. 2. P. 210–219. DOI: 10.1134/S1064229323602871.
24. *Hugelius G., Loisel J., Chadburn S. et al.* Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // *PNAS*. 2020. V. 117. No. 34. P. 20438–20446. DOI: 10.1073/pnas.1916387117.
25. *Karlson M., Bastviken D.* Multi-source mapping of peatland types using Sentinel-1, Sentinel-2, and terrain derivatives — a comparison between five high-latitude landscapes // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2022. V. 128. Iss. 4. Article e2022JG007195. DOI: 10.1029/2022JG007195.
26. *Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al.* Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
27. *Melton J. R., Chan E., Millard K. et al.* A map of global peatland extent created using machine learning (Peat-ML) // *Geoscientific Model Development*. 2022. V. 15. Iss. 12. P. 4709–4738. DOI: 10.5194/gmd-15-4709-2022.
28. *Minasny B., Berglund O., Connolly J. et al.* Digital mapping of peatlands — a critical review // *Earth-Science Reviews*. 2019. V. 196. Article 102870. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.05.014.
29. *Pflugmacher D., Krankina O. N., Cohen W. B.* Satellite-based peatland mapping: Potential of the MODIS sensor // *Global and Planetary Change*. 2007. V. 56. P. 248–257. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.019.
30. *Sheng Y., Smith L. C., Glen M. et al.* A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochemical cycles*. 2004. V. 18. Article GB3004. DOI: 10.1029/2003GB002190.
31. *Terent'eva I. E., Sabrekov A. F., Glagolev M. V. et al.* 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. V. 44. No. 2. P. 297–307. DOI: 10.1134/S0097807817020154.
32. *Vomperskii S. E., Sirin A. A., Sal'nikov A. A. et al.* Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. V. 4. No. 7. P. 734–741. DOI: 10.1134/S1995425511070058.

33. Xu J., Morris P.J., Liu J., Holden J. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis // *Catena*. 2018. V. 160. P. 134–140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.

Development of mapping methods for wetland complexes in Western Siberia based on time series of remote sensing data and machine learning

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev¹, E. A. Dyukarev^{2,3},
E. A. Golovatskaya², I. A. Saigin¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

² *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS*
Tomsk 634055, Russia

³ *Yugra State University, Khanty-Mansiysk 628012, Russia*

This article presents the results of mapping wetland complex types in Tomsk Region based on cloud-free time series of daily remote sensing (RS) data from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). These data were utilized to create composite images of the Earth's surface during periods of snow cover employing the Random Forest ensemble machine learning method. Additionally, digital elevation models such as GTOPO30, ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) and FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus Digital Elevation Model) were used as features in the analysis. The developed peatland typology incorporates findings from other researchers and includes three wetland micro-landscapes with a tree cover (pine-shrub-sphagnum bog — pine bog (ryam), ryam-hollow complex, tree-shrub-moss-herb bog — swamp (sogra)), one complex type (ridge-hollow and ridge-lake complexes), two open types (herb-sphagnum bog, sedge-hypnum fen) and internal wetland lakes. The overall classification accuracy achieved was 0.96, with the completeness of identifying individual types of wetland complexes varying between 0.66 and 0.99. A total of 13.7 million hectares of wetland complexes were identified in Tomsk Region, including 9.4 million hectares predominantly classified as open wetlands. This estimate aligns well with statistical data indicating that the wetland area in the region is approximately 9.2 million hectares. The analysis demonstrates the high informational value of digital elevation models with varying spatial resolutions, as well as RS data collected during periods of snow cover presence and melt, and at the beginning and end of the vegetation period.

Keywords: wetlands, peatland, Tomsk Region, Western Siberia, MODIS, land cover, machine learning.

Accepted: 29.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Bartalev S. A., Khvostikov S. A., *Certificate of state registration of a computer program No. 2023666251 Russian Federation. FORS-MachLearn*, No. 2023664950, Statement 07.14.2023, Publ. 07.27.2023.
3. Vomperskii S. E., Sirin A. A., Tsyganova O. P., Valyaeva N. A., Maikov D. A., Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity, *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya*, 2005, No. 5, pp. 39–50 (in Russian).
4. Evseeva N. S., Sinyutkina A. A., Kharanzhevskaya Yu. A., Voistinova E. S., Romashova T. V., Khromykh V. V., Zemtsov V. A., Sorokin I. B., Guzova E. N., Sirotina E. A., Zhilina T. N., Kvasnikova Z. N., Khromykh O. V.,

- Khromykh V. S., *Landshafty bolot Tomskoi oblasti* (Landscapes of the Tomsk region swamps), Tomsk: Izd. NTL, 2012, 399 p. (in Russian).
5. Il'ina I. S., Lapshina E. I., Makhno V. D., Romanova E. A., Principles of compiling the overview "Vegetation Map of the West Siberian Plain", *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 1977, No. 1977, pp. 41–58 (in Russian), DOI: 10.31111/geobotmap/1977.41.
 6. Il'yasov D. V., Sirin A. A., Makarova L. Yu., Bukin A. V., Korablina N. E., GIS mapping of natural and human-disturbed peatlands in Ryazan oblast, *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva*, 2019, No. 1 (41), pp. 30–38 (in Russian).
 7. Inisheva L. I., Arkhipov V. S., Maslov S. G., Mikhant'eva L. S., *Torfyanye resursy Tomskoi oblasti i ikh ispol'zovanie* (Peat resources of Tomsk region and their use), Novosibirsk: SO RASKhN, 1995, 88 p. (in Russian).
 8. *Karta torfyanykh mestorozhdenii Zapadno-Sibirskoi ravniny masshtaba 1:1 000 000* (Map of peat deposits of the West Siberian Plain at a scale of 1:1,000,000), V. D. Markov (ed.), Moscow: Trest "Geoltorfrazvedka", 1971 (in Russian).
 9. *Karta torfyanykh mestorozhdenii Zapadnoi Sibiri masshtaba 1:1 000 000: Ob'yasnitel'naya zapiska* (Map of peat deposits of Western Siberia at a scale of 1:1,000,000: Explanatory note), Novosibirsk: Izd. SO RAN, Filial "GEO", 2000, 33 p. (in Russian).
 10. Liss O. L., Berezina N. A., *Bolota Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Swamps of the West Siberian Plain), M.: Nauka, 1981, 205 p. (in Russian).
 11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
 12. Medvedeva M. A., Vozbrannaya A. E., Sirin A. A., Maslov A. A., Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 150–159 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
 13. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
 14. Romanova E. A., Bybina R. T., Golitsina E. F., Ivanova G. M., Usova L. I., Trushnikova L. G., *Tipologicheskaya karta bolot Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Typological map of the West Siberian Plain swamps), Leningrad: GUGK, 1977, 500 p. (in Russian).
 15. Sinyutkina A. A., Landscape mapping of swamps in Tomsk region, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2017, No. 2, pp. 21–28 (in Russian).
 16. Sirin A. A., Maslov A. A., Valyaeva N. A., Tsyganova O. P., Glukhova T. V., Mapping of peatlands of Moscow Region based on high resolution satellite imagery data, *Russian J. Forest Science*, 2014, No. 5, pp. 65–71 (in Russian).
 17. Terent'eva I. E., Filippov I. V., Sabrekov A. F. et al., Western Siberia's taiga wetlands mapping based on remote sensing data, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 6, pp. 920–930 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556620060102.
 18. Usova L. I., *Prakticheskoe posobie po landshaftnomu deshifirovaniyu aerofotosnimkov razlichnykh tipov bolot Zapadnoi Sibiri* (A practical guide to landscape interpretation of aerial photographs of various types of swamps in Western Siberia), Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2009, 80 p. (in Russian).
 19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. Application of remote sensing data for wetlands large-scale monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 9–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
 20. Yurkovskaya T. G., Mapping the vegetation of wetland systems, *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 1988, pp. 13–28 (in Russian), DOI: 10.31111/geobotmap/1988.13.
 21. Artz R. R. E., Johnson S., Bruneau P. et al., The potential for modelling peatland habitat condition in Scotland using long-term MODIS data, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 660, pp. 429–442, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.327.
 22. Dyukarev E. A., Alekseeva M. N., Golovatskaya E. A., Study of wetland ecosystem vegetation using satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, pp. 1029–1041, DOI:10.1134/S0001433817090092.
 23. Golovatskaya E. A., Veretennikova E. E., Dyukarev E. A., Greenhouse gas fluxes and carbon sequestration in the oligotrophic peat soils of southern taiga in Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2024, Vol. 57, No. 2, pp. 210–219, DOI: 10.1134/S1064229323602871.
 24. Hugelius G., Loisel J., Chadburn S. et al., Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw, *PNAS*, 2020, Vol. 117, No. 34, pp. 20438–20446, DOI: 10.1073/pnas.1916387117.

25. Karlson M., Bastviken D., Multi-source mapping of peatland types using Sentinel-1, Sentinel-2, and terrain derivatives — a comparison between five high-latitude landscapes, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, Vol. 128, Iss. 4, Article e2022JG007195, DOI: 10.1029/2022JG007195.
26. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
27. Melton J. R., Chan E., Millard K. et al., A map of global peatland extent created using machine learning (Peat-ML), *Geoscientific Model Development*, 2022, Vol. 15, Iss. 12, pp. 4709–4738, DOI: 10.5194/gmd-15-4709-2022.
28. Minasny B., Berglund O., Connolly J. et al., Digital mapping of peatlands — a critical review, *Earth-Science Reviews*, 2019, Vol. 196, Article 102870, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.05.014.
29. Pflugmacher D., Krankina O. N., Cohen W. B., Satellite-based peatland mapping: Potential of the MODIS sensor, *Global and Planetary Change*, 2007, Vol. 56, pp. 248–257, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.019.
30. Sheng Y., Smith L. C., Glen M. et al., A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool, *Global Biogeochemical cycles*, 2004, Vol. 18, Article GB3004, DOI: 10.1029/2003GB002190.
31. Terent'eva I. E., Sabrekov A. F., Glagolev M. V. et al., 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, pp. 297–307, DOI: 10.1134/S0097807817020154.
32. Vomperskii S. E., Sirin A. A., Sal'nikov A. A. et al., Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 734–741, DOI: 10.1134/S1995425511070058.
33. Xu J., Morris P. J., Liu J., Holden J., PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis, *Catena*, 2018, Vol. 160, pp. 134–140, DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.