Космический мониторинг трансформации болотных ландшафтов в условиях антропогенных воздействий

И. Е. Курбатова ^{1,2}, Т. В. Верещака ¹, А. А. Иванова ¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии Москва, 105064, Россия E-mails: irenkurb@yandex.ru, tm.vereshchaka@mail.ru, annyfox46@gmail.com ² Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия

Освещён опыт изучения экологического состояния Уломского болотного массива, расположенного в Вологодской обл. Выявлены виды антропогенных воздействий и их последствия. Исследования выполнены при сочетании картографического и дистанционного методов. Картографический метод применён для идентификации, интерпретации и локализации объектов на космических снимках, а также для изучения многолетней динамики (40 лет) ландшафтов местности. Дистанционные методы обеспечили анализ материалов разновременной космической съёмки Landsat-5, -7, -8 (за 1989, 2000 и 2018 гг.) с целью изучения состояния и трансформации основных индикаторов территории: водных объектов и растительности по индексам NDWI и NDVI. По снимкам выявлена стабильность состояния растительности и конфигурации озёр на территории организованного здесь в 1989 г. заказника (за весь срок его существования) из-за отсутствия антропогенного влияния. В отличие от заказника на торфяниках ряд озёр сократил свою площадь в 3-12 раз. Зафиксирована разная степень восстановления растительного покрова при рекультивации торфоразработок, связанная с неодинаковой мощностью выработанного торфа. Комплексирование картографического и дистанционного методов позволило дифференцировать уникальный болотный массив по степени его нарушенности в условиях антропогенных воздействий разной интенсивности. Выделены зоны с высокой (торфоразработки с рекультивированными участками), умеренной (селитебные, транспортные и сельскохозяйственные территории), низкой нарушенностью (рекультивированные участки), а также ненарушенная территория (Отненский заказник). Результаты исследования и его отдельные этапы представлены в картографическом виде.

Ключевые слова: верховое болото, озёра, растительность, торфоразработки, нарушенная экосистема, космический мониторинг, Landsat, NDVI, NDWI

Одобрена к печати: 05.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227

Введение

Болота играют большую роль в регулировании многих природных процессов и выполняют газорегуляторную, гидрологическую, климатическую, биологическую, ресурсно-сырьевую функции, обогащая атмосферу кислородом и усваивая диоксид углерода, смягчая колебания температуры и влажности воздуха, аккумулируя влагу, очищая поступающие загрязнённые атмосферные воды, а также являясь местообитанием специфической растительности (Боч, Мазинг, 1979; Маслов, 2009; Минаева, Сирин, 2011; Инишева и др., 2019; Сирин, 2019; Lyon, 2001). Поэтому проведение исследований, обеспечивающих получение информации о состоянии болотных угодий, особенно в условиях антропогенных воздействий, является актуальной проблемой. Этой задаче отвечает использование данных дистанционного зондирования в различных направлениях разработок. Достоинство спутникового метода, пришедшего на смену аэрофотосъёмке, заключается в единовременной обзорности состояния труднодоступных болот, что позволяет получать оценки характеристик исследуемой территории вплоть до больших размеров. Кроме того, постоянное совершенствование аппаратуры, устанавливаемой на спутниках, в особенности появление мультиспектральных сенсоров, регистрирующих излучение в разных спектральных каналах, стимулирует разработку новых методов дешифрирования и анализа получаемых спутниковых изображений. Кардинальным шагом в этом направлении является переход от визуального дешифрирования снимков в видимых каналах спектра к автоматизированной обработке дистанционных данных, что предполагает создание алгоритмов и отладку программ тематической обработки спутниковой информации, получаемой в цифровом виде с высоким пространственным разрешением. Многолетний опыт использования материалов космической съёмки способствует решению множества важных задач болотоведения. Болота в России занимают более 3 млн км² (21,6 % территории), их изученность очень неравномерна, и требуются большие усилия при проведении полной инвентаризации болотных экосистем (Огуреева, Котова, 2017). В России работы в этом направлении стали проводиться с начала 2000-х гг. Значительный шаг в инвентаризации болот сделан в Институте лесоведения РАН, где разработана геоинформационная система (ГИС) «Болота и заболоченные земли России», её информационная база, составлены серии цифровых аналитических карт (Вомперский и др., 2011). Детальная инвентаризация проведена по Московской (Сирин и др., 2014), Рязанской (Ильясов и др., 2019), Вологодской (Филоненко, Филиппов, 2013) областям. По дистанционным данным высокого разрешения выявлялась структура болотных микроландшафтов, закономерности их распространения (Ардашникова, 2015; Козелкова, 2013), по тепловым инфракрасным снимкам определялась температура поверхности осушенных болот и её временные и пространственные изменения (Казаков, 2013). Большое количество заброшенных торфоразработок, их высокая пожароопасность обусловили развитие целого направления исследований, посвящённых оценке состояния этих территорий и проблеме их обводнения (Гринченко и др., 2017; Медведева и др., 2011, 2017, 2019).

Актуальным направлением исследований с использованием космических снимков является мониторинг трансформации болотных угодий с выявлением последствий торфодобычи, чему посвящена настоящая работа. В качестве объекта исследования был выбран Уломский болотный массив, находящийся в Вологодской обл. и имеющий большую экологическую значимость для региона.

Характеристика объекта исследования

Изучаемый болотный массив находится северо-западнее Рыбинского вдхр. в междуречье Суды и Мологи и занимает большую часть водораздельного пространства (рис. 1).

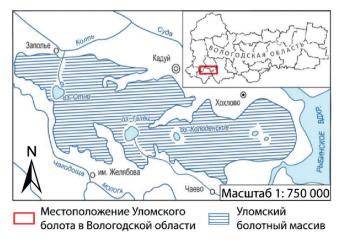


Рис. 1. Географическое положение исследуемого болота (составлено по атласу Вологодской обл. (Атлас... 2007))

Уломское болото — уникальная природная экосистема, одна из крупнейших в Европе, площадью около 180 тыс. га, образовавшаяся в начале голоцена более 12 тыс. лет назад. В наиболее глубоких межгривных понижениях сохранились многочисленные остаточные

водоёмы. На территории болота присутствуют виды растений и водно-болотных птиц, занесённые в Красные книги Российской Федерации и Вологодской обл. (Вода..., 2015). На общирной площади болотного массива находятся участки с различными видами хозяйственного использования.

В 60-х гг. XX в. в юго-восточной части болота открыты крупные залежи торфа, признанные пригодными в качестве топлива для Череповецкой ГРЭС, и начата их разработка. Торфодобыча прекратилась в 1997 г. после перевода ГРЭС на газовое обеспечение. За эти годы было осущено 55 тыс. га — почти третья часть всего болотного массива. Впоследствии были предприняты попытки частичной рекультивации (Вода..., 2015).

На северо-западе массива вокруг оз. Отно с 1989 г. существует государственный комплексный заказник регионального значения «Отненский», созданный с целью охраны верховых болот с остаточными озёрами и сосняками. Отненская группа озёр состоит из 11 водоёмов площадью от 7,5 до 731,0 га и четырёх небольших озёр площадью около 2 га каждое (ООПТ России, http://oopt.aari.ru/oopt/Отненский). Водоёмы занимают 20 % площади заказника, доля болот — около 69 %, а леса распространены лишь на 11 % его территории. Площадь заказника — 6937 га, что составляет всего 3,8 % от площади Уломского болота, хотя многие ученые ещё в начале XX в. считали, что по своей уникальности и масштабности биосферных функций экосистема Уломского болота должна подлежать охране целиком, а не разбиваться на отдельные участки (Вода..., 2015).

Окраины болотного массива и его возвышенные плоские водораздельные поверхности заняты небольшими сельскими поселениями, пахотными землями, сенокосами, транспортной сетью. Остальная часть представлена труднопроходимыми болотами и непроходимыми топями.

Методы и материалы

При проведении настоящего исследования авторы использовали результаты автоматизированной обработки и сравнительный визуальный анализ разновременных многозональных космических изображений. Долговременные регулярные спутниковые наблюдения болотных массивов обеспечивают формирование многолетних рядов данных, необходимых для выявления динамики процессов их осушения, формирования водного и температурного режимов, трансформации растительного покрова и т.п. в районах с разной хозяйственной нагрузкой или её отсутствием.

В работе широко использовались картографический метод исследования, общие принципы картографического моделирования, проектирования и составления карт, приёмы геоинформационного картографирования. Привлечение топографических карт, изданных 30 и более лет назад, позволило увеличить срок наблюдения за изучаемыми объектами, оценить степень и характер изменения их параметров.

Исследования включали три этапа:

- 1. Разработка авторского оригинала тематической карты «Зоны и границы антропогенной нарушенности Уломского болотного массива» в масштабе 1:200 000.
- 2. Выявление изменений площадей водных объектов в зонах различного антропогенного воздействия с 1978 по 2018 г.
- 3. Оценка состояния растительного покрова в зоне торфоразработок и Отненском заказнике.

Разработка авторского оригинала тематической карты основывалась на визуальном анализе спутниковых изображений и физиономическом образе территорий, который является внешним выражением внутренней структуры, генезиса, стадии развития, исторически сложившегося природно-антропогенного ландшафтного комплекса. Именно этот метод позволил дифференцировать территорию массива на четыре зоны разного экологического состояния и выделить границы антропогенной нарушенности.

Для обнаружения поверхностных вод среди заболоченной местности и оценки её водного покрытия использован нормализованный разностный водный индекс (англ. Normalized Difference Water Index — NDWI). Оценка состояния растительности на момент съёмки данного участка местности многоспектральной аппаратурой выполнена по нормализованному дифференцированному вегетационному индексу (англ. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI).

Трансформация болотных ландшафтов выявлялась по топографическим картам масштабов 1:100 000—1:200 000, отображающим ситуацию до и после начала торфоразработок, и материалам разновременной космической съёмки со спутников Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI/TIRS. Критериями выбора снимков стали: летний сезон и отсутствие в пределах изображения облачности, тумана, смога. Отобрано три снимка, покрывающих всю территорию болота на разные даты: 03.06.1989 (Landsat-5 TM); 20.06.2000 (Landsat-7 ETM+); 13.06.2018 (Landsat-8 OLI/TIRS). Через геопортал Геологической службы США EarthExplorer получены атмосферно скорректированные снимки уровня обработки Т1 (Collection 1 Level 2), оптимальные для анализа временных рядов. Для изображений Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ использован метод атмосферной коррекции LEDAPS, а для снимков Landsat-8 OLI/TIRS — алгоритм LaSRC (Landsat Collection 1, https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-1-surface-reflectance). Снимки сверхвысокого разрешения с геопортала Google Планета Земля (англ. Google Earth) привлечены для более детального анализа компонентов болотного ландшафта. Исследование выполнено в программе ArcGIS 10.3.

Результаты исследования

Разработанный авторский оригинал тематической карты «Зоны и границы антропогенной нарушенности Уломского болотного массива» позволил наглядно представить структуру хозяйственной нагрузки на болотный массив и взаимное расположение зон, различных по степени антропогенной нарушенности. Выделены зоны с высокой (торфоразработки с рекультивированными позднее участками), умеренной (селитебные, транспортные и сельскохозяйственные территории), низкой нарушенностью (рекультивированные участки), а также ненарушенная территория (Отненский заказник) (рис. 2, см. с. 220). Далее исследования выполнялись для двух наиболее контрастных зон: максимально нарушенных торфяников и Отненского заказника, сохранившего естественное состояние природных комплексов. Изучение трансформаций компонентов болотных ландшафтов велось по двум направлениям:

- 1) анализ динамических тенденций береговой линии и площади озёр;
- 2) оценка состояния растительности.

Анализ динамических тенденций береговой линии и площади озёр

Болота являются накопителями влаги и источниками питания рек, ручьёв и озёр на своей и близлежащих территориях. Их осушение нарушает гидрологический режим и может привести к обмелению или даже исчезновению водотоков и водоёмов. Поэтому в пределах торфоразработок важно было выявить изменение конфигурации береговых линий и площадей озёр для оценки степени их обмеления и зарастания. Всего на территории торфоразработок насчитывается 9 озёр.

Динамические параметры проанализированы у шести озёр: Белого, Ильмезского, Неверцево, Олешека, Соринского, Удебного, поскольку три озера — Кряково, Сковородное и Чёрное — полностью заросли и зеркало воды в них не просматривается. Выделение береговой линии выполнено по водному индексу NDWI (Özelkan, 2020; Yang et al., 2017). Индекс не имеет единиц измерения и выражается условными значениями от -1 до +1. NDWI вычисляется с использованием двух участков спектра: зелёного (*англ*. Green) и ближнего инфракрасного (*англ*. near infrared — NIR). Водные объекты имеют низкий коэффициент поглощения

в зелёной области спектра и высокий — в ближней инфракрасной, в результате чего хорошо выделяются на фоне других типов земного покрова. Индекс вычисляется по формуле (McFeeters, 1996):

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR},$$

где Green — канал в зелёном диапазоне спектра; NIR — в ближнем инфракрасном.

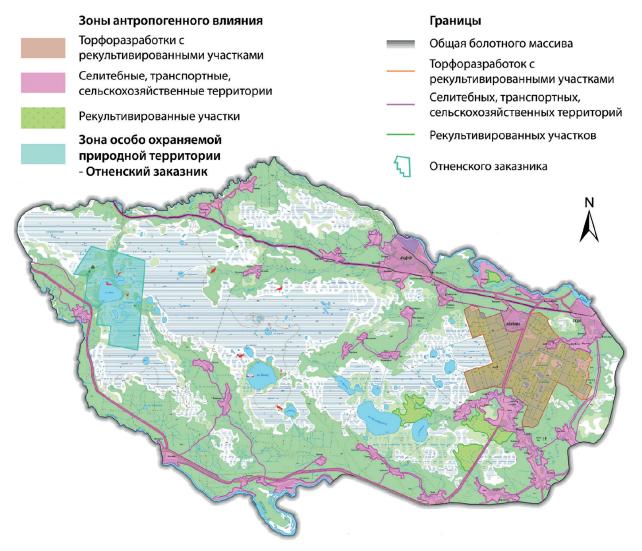


Рис. 2. Авторский оригинал карты масштаба 1: 200 000 «Зоны и границы антропогенной нарушенности Уломского болотного массива». Составлен на топографической основе карты 2001 г. издания

Процедура вычисления индекса NDWI выполнена инструментом Raster Calculator (модуль Spatial Analyst). Следующим этапом стала бинаризация изображения NDWI, которая заключалась в выделении двух классов объектов: водных и не водных. Разделение множества значений на два класса осуществлялось экспертным методом, в результате чего установлены пороговые значения классов: 0,04; 0,01 и 0,03 для 1989, 2000 и 2018 гг. соответственно (рис. 3, см. с. 221).

Перевод изображений озёр из растровых в векторные выполнен инструментом Raster to Polygon (модуль Conversion). Площадь озёр определялась с помощью функции Calculate Geometry. Береговая линия озёр до начала осушения территории визуально идентифицировалась по космическим снимкам благодаря хорошо сохранившейся полосе прибрежной

древесной растительности (*puc. 4*). Анализ площадей озёр показал, что их значительное сокращение происходило после начала осушительных мероприятий, затем процесс замедлялся. За период с 1968 по 2018 г. больше всего сократилось оз. Ильмезское — на 144,09 га, а меньше всего оз. Олежек — на 0,03 га (*табл. 1*).

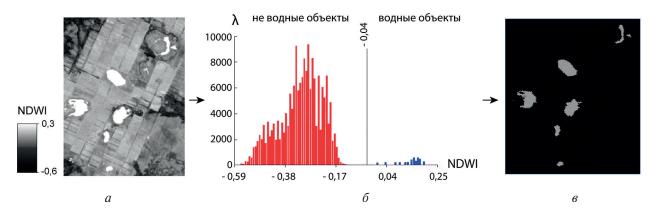


Рис. 3. Бинаризация изображения NDWI (снимок Landsat-5 TM от 03.06.1989): a — изображение NDWI; δ — гистограмма распределения значений индекса NDWI, где λ — количество пикселей изображения водных и не водных объектов; ϵ — бинаризованное изображение

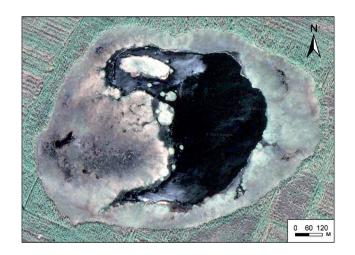


Рис. 4. Заросшее оз. Удебное (первоначальная береговая линия (до начала торфоразработок) очерчена древесной растительностью). Снимок из архива Google Earth, 2018 г.

Таблица 1. Изменение площади озёр на торфоразработках по годам

Озёра	1968 г.		1989 г.		2000 г.		2018 г.	
	га*	%	га**	%	га**	%	га**	%
Белое	39,93	100	38,70	96,91	38,60	96,66	38,55	96,54
Ильмезское	156,49		12,60	8,05	12,50	7,98	12,40	7,92
Кряково	0,94		Заросло полностью					
Неверцево	9,85		9,07	92,08	8,47	85,98	7,01	71,16
Олежек	5,00		4,10	82,00	4,09	81,8	4,07	81,4
Сковородное	3,12		Заросло полностью					
Соринское	60,39		31,28	51,79	23,88	39,54	19,77	32,73
Удебное	90,14		35,80	39,71	28,46	31,57	24,71	27,41
Чёрное	30,37		Заросло полностью					

 Π р и м е ч а н и е: * — площадь до начала разработок; ** — оставшаяся площадь открытой водной поверхности. Площадь каждого озера по состоянию на 1968 г. принята за 100%.

Как видно из *табл. 1*, общая площадь всех озёр до начала торфоразработок составляла 396 га. К 2018 г. их площадь уменьшилась до 106 га, сократившись на 73 %. Такое значительное сокращение обводненности, не восстановившейся после окончания добычи торфа, негативно сказывается на питании малых притоков р. Мологи, составе растительного покрова, микроклимате прилегающих территорий и их пожароопасности.

Сравнение береговых линий озёр Отненского заказника на топографической карте 1978 г. и космическом снимке 2018 г. показало, что водные объекты в районах, не подвергавшихся интенсивному антропогенному вмешательству, сохранили за прошедшие 40 лет свои размеры и, соответственно, стабильность водного режима, способность к саморегулированию (рис. 5).

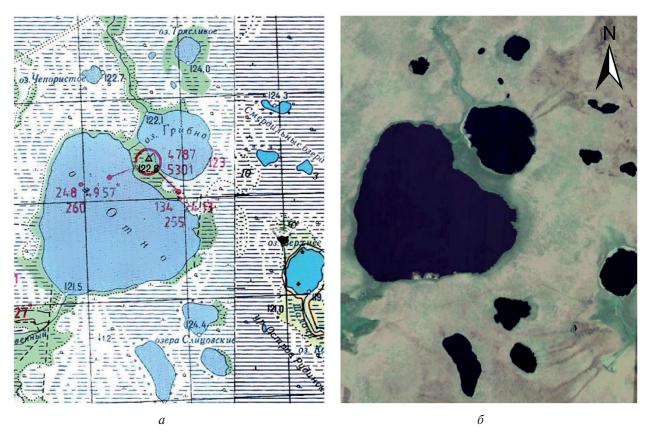


Рис. 5. Изображение озёр в пределах Отненского заказника: a — фрагмент топографической карты масштаба 1:100 000, 1978 г.; δ — космический снимок из архива Google Earth, 2018 г.

Анализ динамических тенденций состояния растительности

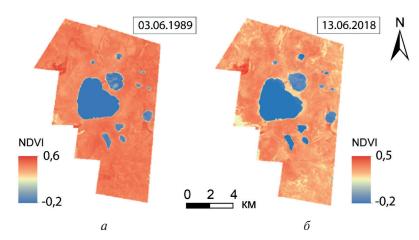
Осушение и последующая добыча торфа на болотах всегда сопровождаются нарушением растительного покрова, так как перед разработкой торфяного месторождения выкорчёвываются кустарники и деревья. Оптимальный вариант количественного анализа и мониторинга состояния растительности — вычисление вегетационного индекса NDVI по стандартной формуле инструментом Raster Calculator:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

где NIR — канал в ближнем инфракрасном диапазоне спектра; Red — канал в красном диапазоне спектра.

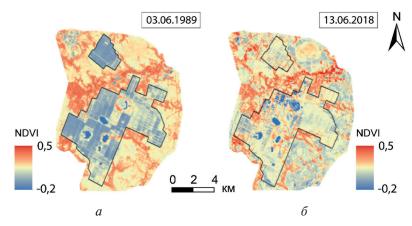
Распределение NDVI в пределах Отненского заказника свидетельствует о стабильности состояния растительности с 1989 по 2018 г. из-за отсутствия антропогенной деятельности.

В 1989 г. высокие значения NDVI связаны с лесными территориями (0,52-0,60). Участки непроходимых и труднопроходимых болот, заросшие в основном моховой и травянистой растительностью, имеют относительно высокие и средние значения индекса (0,35-0,42). В 2018 г. наблюдается небольшое снижение значений NDVI для лесной (0,4-0,5) и болотной (0,25-0,3) растительности. Это могло быть связано с изменениями температуры, количества осадков и т.п. (puc. 6).



Puc. 6. Распределение значений индекса NDVI в пределах Отненского заказника: a — изображение Landsat-5 TM от 03.06.1989; δ — изображение Landsat-7 ETM+ от 13.06.2018

На торфоразработках наблюдаются более контрастные изменения растительного покрова с 1989 по 2018 г., поскольку значения NDVI стали выше (*puc.* 7).



Puc. 7. Распределение значений индекса NDVI в пределах торфоразработок: a — изображение Landsat-5 TM от 03.06.1989; δ — изображение Landsat-7 ETM+ от 13.06.2018

Сравнение изображений, полученных в разные годы для июня, позволило выделить три типа участков торфоразработок, на которых значения NDVI менялись по-разному: бровки дренажных каналов, торфяные поля сильно выработанные, торфяные поля слабо выработанные.

В 1989 г., пока активно велась добыча торфа, торфоразработки чётко выделялись среди окружающей местности. В целом для всех выделенных типов участков характерны низкие значения NDVI (0,13—0,19). В 2018 г. состояние растительности улучшилось в связи с тем, что в начале 2000-х гг. была проведена биологическая рекультивация торфоразработок в виде лесонасаждений. Преобладающей породой является берёза, приспособленная к произрастанию в переувлажнённых условиях. Для бровок каналов характерны более высокие значения

NDVI, чем для торфяных полей, где также наблюдаются различия в восстановлении растительного покрова. Дифференциация объясняется степенью выработки полей. Имеется обратная зависимость между состоянием растительности и мощностью торфяного слоя. Там, где толщина торфа меньше и ближе минеральные грунты, растительность развивается лучше (NDVI 0,40-0,46), и наоборот, где мощность торфяного слоя больше, растительный покров чаще всего разреженный и в основном угнетён (NDVI 0,20-0,28). Количественная оценка изменения NDVI на территории торфоразработок получена как разность индексов за 2018 и 1989 гг. инструментом Minus (модуль Spatial Analyst). На разностном изображении хорошо просматриваются выделенные нами типы участков (puc. 8).

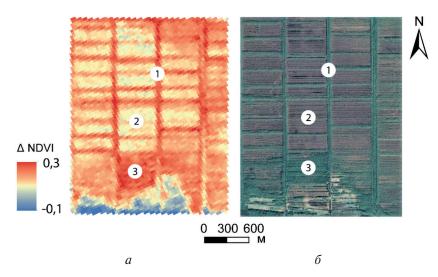


Рис. 8. Выявленные участки торфоразработок по изображению индекса NDVI за разные годы: a — разностное изображение индекса NDVI за 06.03.1989 и 13.06.2018; δ — космический снимок Google Earth, 2018 г. Участки в пределах торфоразработок: 1 — бровки дренажных каналов; 2 — торфяные поля слабо выработанные; 3 — торфяные поля сильно выработанные

Динамика восстановления растительности на разных участках торфоразработок показана в $m a \delta n$. 2 (по изменению индекса NDVI).

Тип участка	Значени	Изменение NDVI с 1989		
	июнь 1989 г., min/max	июнь 2018 г., min/max	по 2018 г., min/max	
Бровки дренажных каналов	0,14/0,19	0,40/0,46	0,26/0,27	
Торфяные поля слабо выработанные	0,13/0,15	0,20/0,28	0,07/0,13	
Торфяные поля сильно выработанные	0,13/0,16	0,40/0,46	0,27/0,30	

Таблица 2. Изменение значений индекса NDVI для разных типов участков в пределах торфоразработок

Заключение

Проведённые на примере Уломского болота исследования подтвердили эффективность космического мониторинга с применением методов картографического анализа состояния местности. Суммарный временной охват составил 40 лет, в течение которых болотный массив претерпел значительную трансформацию в районах торфоразработок, что наглядно подтверждается изменением состояния основных индикаторов территории: водных объектов и растительности, выявленных по материалам съёмки Landsat-5, -7, -8 за 1989, 2000 и 2018 гг.,

и значениям индексов NDWI и NDVI. В результате осущения площадь водных объектов в районе торфоразработок уменьшилась на 290 га и после окончания работ не восстановилась. Через 20 лет после рекультивации территории добычи зафиксирована разная степень восстановления растительного покрова. При этом на незатронутых антропогенным вмешательством участках заказника изменения состояния водных объектов не отмечены, а состояние растительности практически осталось неизменным. Полученные результаты могут быть использованы для контроля и прогноза дальнейших изменений нарушенных ландшафтов и оценки их способности к восстановлению, а также для разработки мероприятий по охране болотных массивов в целом.

Работа выполнена в рамках государственных заданий № 0708-2020-0001 (Московский Государственный Университет геодезии и картографии) и АААА-А19-119040990079-3 № 0147-2019-0004 (Институт водных проблем РАН) Минобрнауки России.

Литература

- 1. *Ардашникова С. В.* Опыт картографирования болотных микроландшафтов части Васюганского болота на основе спектральной классификации космических снимков // Геоматика. 2015. № 2. С. 46—51.
- 2. Атлас Вологодской области / ред. Е.А. Скупинова. Череповец: Порт-Апрель, 2007. 107 с.
- 3. *Боч М. С.*, *Мазинг В. В.* Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 188 с.
- 4. Вода России: научно-популярная энциклопедия. 2015. URL: https://water-rf.ru (дата обращения: 15.12.2020).
- 5. Вомперский С. Э., Сирин А. А., Сальников А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3—11.
- 6. *Гринченко О. С., Щербаков А. В., Любезнова Н. В., Кольцов Д. Б.* Эффективность реабилитации экосистем обводненных торфяников на основе анализа динамики растительности и авифауны (Талдомского района Московской области) // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 4. С. 23—39.
- 7. *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. агротехнологич. ун-та. 2019. № 1(41). С. 30–38.
- 8. *Инишева Л. И.*, *Порохина Е. В.*, *Сергеева М. А.*, *Кобак К. И.* Торфяные болота и их биосферная роль // Биосфера. 2019. Т. 11. № 3. С. 128—133.
- 9. *Казаков А. А.* Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2013. № 4. С. 161—167.
- 10. *Козелкова Е. Н.* Дешифрирование болотных комплексов космоснимка Landsat 7 Нижневартовского района XMAO ЮГРЫ // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2013. Вып. 3(30). С. 35–38.
- 11. Маслов Б. С. Гидрология торфяных болот. М.: Россельхозакадемия, 2009. 266 с.
- 12. *Медведева М.А.*, *Возбранная А. Е.*, *Барталев С.А.*, *Сирин А.А.* Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 80–88.
- 13. *Медведева М.А.*, *Возбранная А.Е.*, *Сирин А.А.*, *Маслов А.А.* Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 76—84.
- 14. *Медведева М.А.*, *Возбранная А. Е.*, *Сирин 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.
- 15. *Минаева Т. Ю.*, *Сирин А. А.* Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393—406.
- 16. *Огуреева Г. Н.*, *Котова Т. В.* Болота как объект изучения в биоэкологическом картографировании России // VIII Галкинские Чтения: материалы конф. Санкт-Петербург. 2—3 февр. 2017. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 94—97.
- 17. *Сирин А.А.* Торфяные болота: свойства, функции, экосистемные услуги // X Галкинские Чтения: материалы конф. Санкт-Петербург. 4–6 февр. 2019. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 183–185.

- 18. *Сирин А.А.*, *Маслов А.А.*, *Валяева Н.А.*, *Цыганова О. П.*, *Глухова Т.В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съёмки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
- 19. *Филоненко И. В.*, *Филиппов Д. А.* Оценка площади болот Вологодской области // Тр. Инсторфа. Тверь: ТвГТУ, 2013. № 7(60). С. 3–11.
- 20. Lyon J. G. Wetland Landscape Characterization. Boca Raton: CRC Press, 2001. 144 p.
- 21. *McFeeters S. K.* The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. P. 1425–1432. URL: https://doi.org/10.1080/01431169608948714.
- 22. Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI // Polish J. Environmental Studies. 2020. No. 29. P. 1759–1769. DOI: 10.15244/pjoes/110447.
- 23. Yang X., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening // Remote Sensing. 2017. V. 9(6). 596. 18 p.

Space monitoring bog landscape transformation under anthropogenic impact conditions

I. E. Kurbatova ^{1,2}, T. V. Vereshchaka ¹, A. A. Ivanova ¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia E-mails: irenkurb@yandex.ru, tm.vereshchaka@mail.ru, annyfox46@gmail.com

² Water Problems Institute RAS. Moscow 119333. Russia

The experience of studying the ecological state of the Ulomsky bog massif located in the Vologda Region is presented. The types of anthropogenic impacts and their consequences are identified. The research was carried out using a combination of cartographic and remote sensing methods. The cartographic method is used to identify, interpret and localize objects in space images, as well as to study the long-term dynamics (40 years) of terrain landscapes. Remote sensing methods provided the analysis of materials from the Landsat-5, -7, -8 multi-temporal space imagery (for 1989, 2000 and 2018) to study the condition and transformation of the main indicators of the territory — water bodies and vegetation according to the NDWI and NDVI indices. According to the images, the stability of the vegetation condition and the lake configurations on the territory of the reserve organized here in 1989 (for the entire period of its existence) was revealed due to the absence of anthropogenic influence. In contrast to the nature reserve on peatlands, several lakes have reduced their area by 3-12 times. A different degree of restoration of the vegetation cover during the recultivation of peat extraction was recorded, associated with the unequal power of the produced peat. The integration of cartographic and remote sensing methods made it possible to differentiate the unique bog massif according to the degree of its disturbance under the conditions of anthropogenic impacts of different intensities: high (peat extraction with reclaimed areas), moderate (residential, transport and agricultural areas), low (reclaimed areas), undisturbed territory (Otnensky reserve). The results of the study and its stages are presented in cartographic form.

Keywords: raised bog, lakes, vegetation, peat extraction lands, disturbed ecosystem, space monitoring, Landsat, NDVI, NDWI

Accepted: 05.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227

References

- 1. Ardashnikova S. V., Wetland microlandscape mapping based on spectral classification of RapidEye images, *Geomatika*, 2015, No. 2, pp. 46–51 (in Russian).
- 2. *Atlas Vologodskoi oblasti* (Atlas of the Vologda region), E.A. Skupinova (ed.), Cherepovets: Port-Aprel', 2007, 107 p. (in Russian)

- 3. Boch M. S., Mazing V. V., *Ekosistemy bolot SSSR* (Ecosystems of the USSR mires), Leningard: Nauka, 1979, 188 p. (in Russian).
- 4. *Voda Rossii* (Water of Russia), 2015, available at: https://water-rf.ru (in Russian, accessed 15.12.2020).
- 5. Vompersky S. E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O. P., Valyaeva N.A., 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.
- 6. Grinchenko O. S., Shcherbakov A. V., Lubeznova N. V., Koltsov D. B., Efficiency of the rehabilitation of the watered peatlands ecosystems, based on the analysis of the vegetation and avifauna dynamic (Taldomsky district, Moscow Oblast), *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2017, Vol. 1, No. 4, pp. 23–39 (in Russian).
- 7. 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*, 2019, No. 1(41), pp. 30–38 (in Russian).
- 8. Inisheva L. I., Porokhina Ye. V., Sergeyeva M. A., Kobak K. I., Peatlands and their role in the biosphere, *Biosfera*, 2019, Vol. 11, No. 3, pp. 128–133 (in Russian).
- 9. Kazakov A. A., Remote geothermal sensing of Western Siberia bogs (the case of Tarmany marsh massif), *Tyumen State University Herald*, 2013, No. 4, pp. 128–132 (in Russian).
- 10. Kozelkova E. N., Deciphering wetland complexes satellite imagery Landsat 7.0. Nizhnevartovsk region of Khanty-Mansiysk Yugra, *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, Issue 3(30), pp. 35–38 (in Russian).
- 11. Maslov B. S., *Gidrologiya torfyanykh bolot* (Hydrology of Peat Bogs), Moscow: Rossel'khozakademiya, 2009, 266 p. (in Russian)
- 12. Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A., Sirin A.A., Multispectral Remote Sensing for Assessing Changes on Abandoned Peat Extraction Lands, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 80–88 (in Russian).
- 13. Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A., Capabilities of multispectral remote sensing data in assessment of the status of abandoned fire hazardous and rewetting peat extraction lands, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 3, pp. 76–84 (in Russian).
- 14. 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 (in Russian).
- 15. Minaeva T. Yu., Sirin A.A., Peatland biodiversity and climate change, *Biology Bulletin Reviews*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 164–175.
- 16. Ogureeva G. N., Kotova T. V., Mires as study object at bioecological mapping of Russia, *VIII Galkinskie Chteniya* (VIII Galkin Readings), Proc. Conf., Saint Petersburg, 2–3 Febr. 2017, Saint Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ., 2017, pp. 94–97 (in Russian).
- 17. Sirin A.A., Peatlands: features, functions, ecosystem services, *X Galkinskie Chteniya* (X Galkin Readings), Proc. Conf., Saint Petersburg, 4–6 Febr. 2019, Saint Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ., 2019, pp. 183–185 (in Russian).
- 18. Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V., Mapping of peatlands in the Moscow oblast based on high-resolution remote sensing data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 808–814 (in Russian).
- 19. Filonenko I.V., Filippov D.A., Estimation of the area of mires in the Vologda region, *Trudy Instorfa*, Tver: TvGTU, 2013, No. 7(60), pp. 3–11 (in Russian).
- 20. Lyon J. G., Wetland Landscape Characterization, Boca Raton: CRC Press, 2001, 144 p.
- 21. McFeeters S. K., The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, pp. 1425–1432, available at: https://doi.org/10.1080/01431169608948714.
- 22. Özelkan E., Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI, *Polish J. Environmental Studies*, 2020, No. 29, pp. 1759–1769, DOI: 10.15244/pjoes/110447.
- 23. Yang X., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L., Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(6), 596, 18 p.