

И. Р. Рахматуллина**З. З. Рахматуллин****О. В. Тагирова****Г. Г. Хамидуллина****А. Ю. Кулагин****Использование вегетационных индексов для оценки характеристик сосновых насаждений г. Уфы и ее пригородов**

На территории Уфимского лесничества заложены 16 пробных площадей в насаждениях сосны обыкновенной, имеющих возраст более 50 лет. Пробные площади разделены на 3 группы: зона контроля, зона с преобладанием нефтехимического загрязнения и зона с высокой автотранспортной и рекреационной нагрузкой. По снимку Sentinel-2 построены растры вегетационных индексов: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), дана их характеристика. По каждой пробной площади получены и проанализированы средние значения этих индексов. Установлены взаимосвязи индексов NDVI, EVI, SAVI с состоянием и возрастом насаждений, позволяющие выделять насаждения, в которых снижается содержание хлорофилла. Совместное применение этих индексов дает возможность выделять больше градаций в состоянии насаждений и охарактеризовать степень их неоднородности. Четкой зависимости NDWI от состояния сосновых насаждений не наблюдается, необходимы дополнительные исследования по обеспеченности растений влагой.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, космический снимок Sentinel-2, NDVI, SAVI, EVI, NDWI.

Введение

Лесные насаждения являются эффективным средством оздоровления и поддержания благоприятной экологической обстановки на урбанизированных и промышленных территориях. Они выполняют санитарно-гигиенические, рекреационные, эстетические и другие средообразующие функции. Однако техногенная нагрузка сказывается на развитии и состоянии древесных растений.

Большую популярность при изучении экологии растений приобретает использование данных дистанционного зондирования Земли, на которых фиксируется, как наземная биомасса растений поглощает и отражает солнечный свет в различных участках электромагнитного спектра. Анализируя спектры изображений, можно получить качественные и количественные данные о видовом, возрастном составе, биологической продуктивности, морфологических особенностях, жизненном состоянии, повреждениях лесных насаждений и их взаимосвязях с условиями обитания, а также, учитывая исторический период съемок, оценить эти показатели в многолетней динамике, прогнозировать их и картографировать [18; 28; 29].

Разновидностью такого анализа является построение вегетационных индексов, учитывающих соотношение различных спектральных диапазонов [5; 6; 25; 26].

При использовании и интерпретации вегетационных индексов необходимо учитывать их высокую временную и пространственную изменчивость, зависящую не только от характеристик растительности, но и от состояния атмосферы, рельефа, почвенного фона и надпочвенного покрова. При этом изменчивость проявляется как в течение вегетационного периода, так и между разными годами. Все это не позволяет ориентироваться на абсолютные значения вегетационных индексов. Поэтому для изучения растительности по спектральным снимкам необходима оценка взаимосвязей между вегетационными ин-

© Рахматуллина И. Р., Рахматуллин З. З., Тагирова О. В., Хамидуллина Г. Г., Кулагин А. Ю., 2021

дексами и характеристиками лесных насаждений по фенологическим фазам и конкретным регионам [7].

Практические приемы использования вегетационных индексов разрабатываются и применяются широким кругом зарубежных и отечественных исследователей. Традиционно большая часть этих работ посвящена мониторинговым исследованиям ландшафтного покрова [3; 12; 14; 31], оценке степени зарастания нарушенных земель и процессов лесовосстановления на вырубках [2; 13; 19]. Свободный доступ к спутниковым снимкам относительно высокого и высокого пространственного разрешения способствовал развитию исследований по изучению совокупностей и структуры связей между лесными насаждениями и средой их обитания [4; 7; 20]. Однако для территории г. Уфы и ее окрестностей подобных работ недостаточно [9; 15; 16], что и обусловило актуальность исследования.

Цель исследования — установить взаимосвязи между вегетационными индексами, полученными на основе мультиспектрального снимка Sentinel-2, и характеристиками основных насаждений Уфимского лесничества Республики Башкортостан.

Задачи:

1. Заложение пробных площадей в сосновых насаждениях Уфимского лесничества и определение таксационных показателей по данным лесоустройства.
2. Расчет вегетационных индексов пробных площадей на основе снимка Sentinel-2.
3. Анализ взаимосвязей между характеристиками сосновых насаждений и вегетационными индексами.

Объекты исследования. В качестве объекта исследования выбраны сосновые насаждения, расположенные на территории Уфимского лесничества Республики Башкортостан.

Город Уфа — промышленный, административно-территориальный и культурный центр, железнодорожный и автомобильный узел. Расположен в пределах Прибельской равнины, к западу от хребтов Урала. Основная часть города находится в междуречье рек Белой и Уфы. Тип климата — континентальный. Территория города относится к зоне высокого потенциала загрязнения атмосферы.

Основные источники загрязнения атмосферы: предприятия электроэнергетики и нефтеперерабатывающей промышленности, автомобильный транспорт. Основной вклад в выбросы стационарных источников вносят предприятия по нефтепереработке — филиалы ПАО АНК «Башнефть» («Уфанефтехим», «Уфимский НПЗ», «Башнефть-Новоил»), а также предприятия по производству и распределению электроэнергии, газа и воды (ООО «Башкирская генерирующая компания», «Баш РТС-Уфа», ТЭЦ). В структуре выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в 2019 г. от стационарных источников преобладали (тыс. т.): SO_2 — 16,6; NO_2 — 12,6; CO — 11,0; твердые вещества — 1,8. Выбросы автотранспорта составили 38% суммарных антропогенных выбросов, среди них CO — 66 тыс. т, NO_2 — 6,8 тыс. т [8].

Преобладающими на территории города являются ветры южных и юго-западных направлений. Почвенный покров разнообразен и представлен аллювиальными, темно-серыми лесными, серыми лесными почвами и черноземами выщелоченными [1].

В зависимости от расположения промышленной, селитебной и рекреационной зон, направления ветров, а также с учетом сложившейся практики [10] были заложены 16 пробных площадей (ПП) в высокопродуктивных снытевых насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Уфимского лесничества, имеющих возраст более 50 лет (рис. 1). Размеры пробных площадей составили 50×50 м (0,25 га).

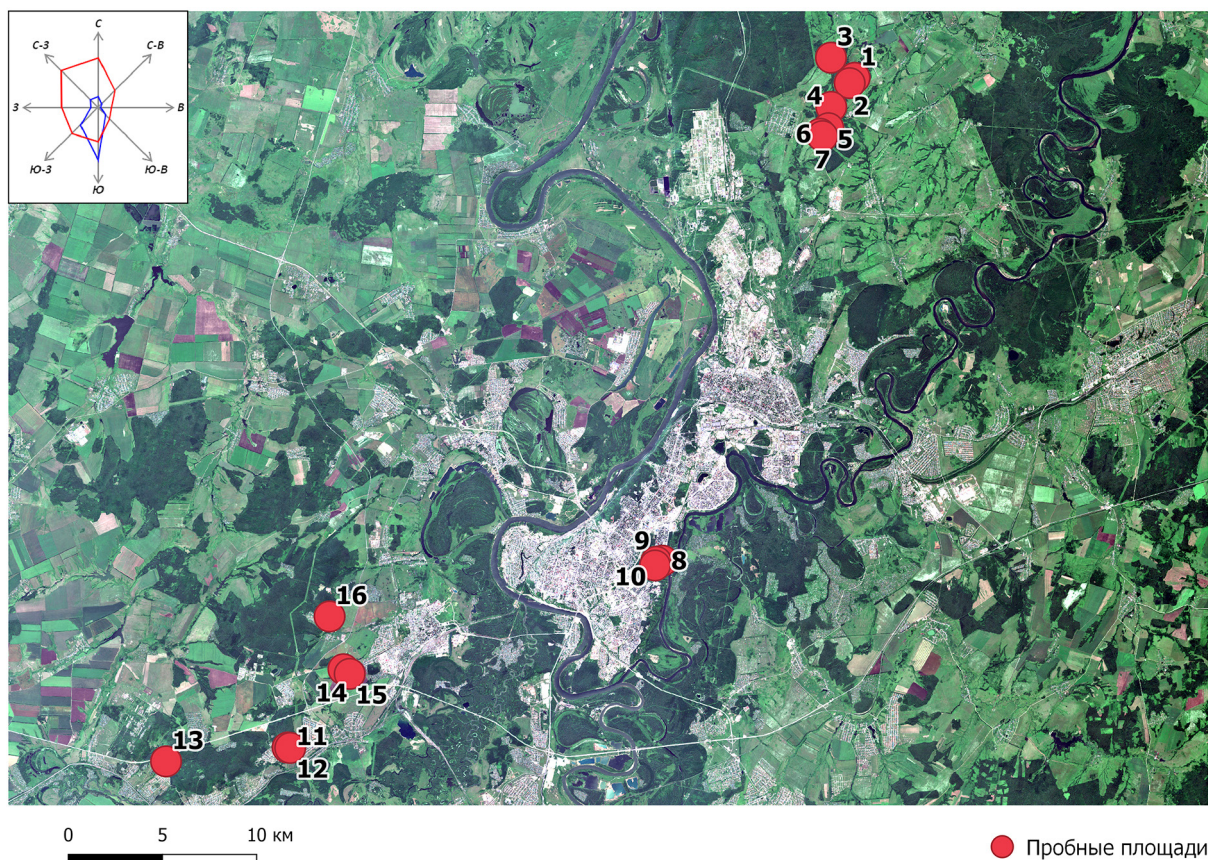


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей в окрестностях г. Уфы

Первая зона «Север» расположена к северу от города, в зоне нефтехимического загрязнения. В этой зоне действуют 3 нефтеперерабатывающих завода ПАО АНК «Башнефть», а также ТЭЦ-3, ТЭЦ-4. Пробные площади находятся на северо-востоке по отношению к промышленной зоне. Здесь заложено 7 пробных площадок (ПП1—ПП7) в Благовещенском и Покровском участковом лесничествах.

Вторая зона «Центр» расположена в лесопарке им. Лесоводов Башкортостана — в центральной части города. Поэтому здесь влияние нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств уменьшается, достигая среднего уровня. Но возрастает доля загрязнений от передвижных (автотранспортных) источников. Так, лесопарк находится между двумя крупнейшими автомагистралями — проспектом Салавата Юлаева и улицей Менделеева. К тому же он испытывает высокую рекреационную нагрузку — является излюбленным местом отдыха горожан и туристов. В парке заложены 3 пробные площади (ПП8—ПП10).

Третья зона «Юго-запад» — зона относительного контроля в юго-западных пригородах Уфы. Заложено 6 пробных площадей (ПП11—ПП16) в Юматовском, Чишминском и Дмитриевском участковых лесничествах. ПП11 и ПП12 относятся к действующему дендрологическому памятнику природы регионального значения «Юматовские опытные лесные культуры» (Постановление СМ БАССР от 17.08.1965) [11].

Таксационные характеристики пробных площадей представлены в таблице 1.

Методы исследований

Для вычисления вегетационных индексов был выбран мультиспектральный снимок миссии Sentinel-2 Европейского космического агентства (ESA) в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник» (Copernicus). Косми-

ческий аппарат Sentinel-2 позволяет получать снимки в 13 каналах видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной части спектра. Пространственное разрешение снимков варьирует в зависимости от канала.

Таблица 1

Таксационные характеристики пробных площадей

Номер ПП	Участковое лесничество*	Номер квартала	Номер выдела	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Бонитет	Полнога	Запас, куб. м/га
1	1	149	7	10С	54	23	28	1А	0,7	260
2		149	10	10С	54	23	28	1А	0,9	260
3		147	11	9С1Ос	67	23	28	1	0,9	330
4		150	26	10С+Кл+Лп	53	22	24	1А	0,7	250
5	2	23	3	10С+Кл	65	23	28	1	0,9	330
6		23	8	10С+Кл	65	25	30	1А	0,8	320
7		23	12	10С+Лп	65	24	30	1	0,8	300
8	3	19	19	10С	75	27	28	1А	0,9	400
9		19	14	10С	82	28	32	1А	0,9	410
10		19	35	10С	77	29	32	1А	0,8	380
11	4	43	20	10С+Кл+В	75	30	32	1А	0,7	340
12		43	22	10С+Кл+В	59	27	24	1А	1,0	440
13	5	80	27	10С	62	23	26	1	0,6	300
14	6	41	5	10С+Лп+Ил+Кл	63	26	26	1А	0,9	380
15		41	24	10С+Д+Лп	60	26	26	1А	0,9	380
16		36	16	10С+Кл	55	21	22	1	0,8	260

* 1 — Благовещенское, 2 — Покровское, 3 — Уфимское, 4 — Юматовское, 5 — Чишминское, 6 — Дмитриевское.

Четыре канала имеют 10-метровое разрешение, это каналы видимого (B02 — голубой, B03 — зеленый, B04 — красный) и ближнего инфракрасного (B08) диапазона.

Шесть каналов имеют 20-метровое разрешение, это каналы «красной границы» или «крайние красные» (Vegetation red edge — B05, B06, B07), которые восприимчивы к содержанию хлорофилла и поэтому перспективны при анализе и интерпретации характеристик растительности; а также каналы узкого ближнего инфракрасного (Narrow NIR — B08A) и дальнего инфракрасного (SWIR — B11, B12) спектра.

Разрешение 60 м — у каналов B01 (прибрежные аэрозоли), B09 (водяной пар), B10 (дальний инфракрасный — перистые облака). Высокое пространственное разрешение, широкий территориальный охват (290 км), частые повторные съемки (2—3 дня) являются преимуществом Sentinel-2 по сравнению с Landsat 8 [22].

Для вычисления вегетационных индексов была использована сцена S2A_MSIL2A_20190715T072621_N0213_R049_T40UDF_20190715T093414.SAFE. Данные доступны по адресу <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>.

Снимок от 15 июля 2019 г., с облачностью 4,3%, над исследуемой территорией — преимущественно безоблачный. Снимок относится к уровню обработки 2A и включает радиометрическую, геометрическую, а также атмосферную коррекцию, в результате которой каждый пиксель снимка показывает отражение света на нижней границе атмо-

сферы. Атмосферная коррекция производится на основе обработки снимков уровня 1С (отражение на верхней границе атмосферы).

Построение и анализ вегетационных индексов снимка производились в программном продукте SAGA GIS — System for Automated Geoscientific Analyses, ver. 7.6.3 (<http://www.saga-gis.org>). Растры вегетационных индексов были построены с помощью встроенных инструментов Vegetation Index — Slope Based (NDVI, SAVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Grid Calculator (NDWI) [21].

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, нормализованный разностный вегетационный индекс) является самым распространенным. Впервые описан Rouse et al. [30]. Рассчитывается по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где *NIR* — излучение в ближнем инфракрасном спектре, *RED* — излучение в видимом красном участке спектра. В наименовании каналов Sentinel-2 это каналы B08 и B04 соответственно.

Построение индекса основывается на различиях в поглощающей способности хлорофилла в листьях растений на разных участках спектра. Хлорофилл активно поглощает солнечную радиацию в красном спектре и отражает в ближнем инфракрасном [32]. Значения индекса находятся в диапазоне от -1 (отсутствие растительности) до 1 (наличие растительности с максимальным содержанием хлорофилла). Не рекомендуется применять для анализа разреженной и бедной растительности.

2. Enhanced Vegetation Index (EVI) — усовершенствованный вегетационный индекс. Является модификацией NDVI, позволяющей уменьшить влияние атмосферы и почвенного фона путем ввода поправочных коэффициентов. Поэтому возможно его применение при анализе низкополотной, редкой растительности, а также в условиях загрязнения окружающей среды. Рассчитывается по формуле:

$$EVI = 2,5(NIR - RED) / (NIR + C_1RED - C_2BLU + L),$$

где *NIR* — излучение в ближнем инфракрасном спектре, *RED* — излучение в видимом красном участке спектра, *BLU* — излучение в голубом участке спектра. В наименовании каналов Sentinel-2 это каналы B08, B04 и B02 соответственно. $L = 1$ — поправочный коэффициент почвы. $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$ — коэффициенты, позволяющие корректировать воздействия аэрозолей [27].

3. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) — вегетационный индекс, минимизирующий влияние почвы. Возможно применение при разреженной растительности, при угнетении фотосинтетической активности, при неполном проективном покрытии растительности. Является модификацией NDVI, учитывающей влияние подстилающей поверхности при помощи корректирующего фактора *L*, введенного Huete [26]:

$$SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) \times (1 + L),$$

где *NIR* — спектральный отклик в ближнем инфракрасном спектре, *RED* — спектральный отклик в видимом красном участке спектра, *L* — корректирующий фактор ($L = 0$ при наибольшем индексе облиствения, $L = 1$ — при наименьшем. В расчетах было выбрано $L = 0,5$).

4. NDWI — нормализованный разностный водный индекс. В отличие от рассмотренных выше индексов основывается на соотношении отражательной способности не хлорофилла, а воды. Строится по диапазонам ближнего и дальнего инфракрасного участков спектра. Используется для определения и идентификации водных объектов, а также относительного содержания влаги в фитомассе растений. Рассчитывается по формуле:

$$NDWI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1),$$

где *NIR* — излучение в ближнем инфракрасном спектре, *SWIR1* — излучение в дальнем инфракрасном спектре. В наименовании каналов Sentinel-2 это B08 и B11 соответственно [24].

На построенные индексные изображения (растры) накладывались векторные слои пробных площадей в виде предварительно отобранных и скорректированных лесотаксационных выделов таким образом, чтобы пробные площади не охватывали границы выделов и не включали другие породы. Затем индексные растры последовательно обрезались по границе каждой пробной площади.

Полученные данные обрабатывались методами описательной статистики и корреляционного анализа в программах SAGA GIS и Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате составления индексных растров на основе снимка Sentinel-2, выполненного в фазе максимальной вегетации древесных растений, получены широкие диапазоны значений вегетационных индексов. Так, значения NDVI в целом по снимку колеблются от $-0,24$ до $0,91$. У водных объектов наблюдаются отрицательные значения, у древесных насаждений — положительные.

Если рассматривать показатели по пробным площадям, то диапазон значений вегетационных индексов становится намного уже. Так, значения NDVI по заложенным пробным площадям находятся в диапазоне от $0,70$ до $0,83$ (табл. 2).

Таблица 2

Вегетационные индексы по пробным площадям (среднее \pm стандартное отклонение)

Номер ПП	NDVI	EVI	SAVI	NDWI
1	0,80 \pm 0,01	0,83 \pm 0,03	1,20 \pm 0,02	0,40 \pm 0,01
2	0,83 \pm 0,01	0,93 \pm 0,06	1,23 \pm 0,02	0,36 \pm 0,01
3	0,79 \pm 0,01	0,80 \pm 0,04	1,18 \pm 0,02	0,33 \pm 0,02
4	0,80 \pm 0,01	0,83 \pm 0,05	1,19 \pm 0,02	0,38 \pm 0,01
5	0,78 \pm 0,01	0,76 \pm 0,05	1,16 \pm 0,03	0,39 \pm 0,02
6	0,77 \pm 0,02	0,75 \pm 0,06	1,16 \pm 0,02	0,39 \pm 0,02
7	0,77 \pm 0,02	0,74 \pm 0,05	1,15 \pm 0,02	0,36 \pm 0,02
8	0,71 \pm 0,01	0,60 \pm 0,02	1,07 \pm 0,02	0,40 \pm 0,02
9	0,70 \pm 0,01	0,56 \pm 0,02	1,05 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01
10	0,71 \pm 0,01	0,58 \pm 0,02	1,06 \pm 0,01	0,36 \pm 0,02
11	0,76 \pm 0,02	0,70 \pm 0,01	1,14 \pm 0,01	0,41 \pm 0,01
12	0,77 \pm 0,01	0,73 \pm 0,01	1,16 \pm 0,01	0,42 \pm 0,01
13	0,76 \pm 0,01	0,70 \pm 0,02	1,13 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01
14	0,76 \pm 0,01	0,71 \pm 0,02	1,14 \pm 0,01	0,41 \pm 0,01
15	0,76 \pm 0,01	0,71 \pm 0,03	1,15 \pm 0,01	0,41 \pm 0,01
16	0,78 \pm 0,01	0,76 \pm 0,02	1,17 \pm 0,01	0,41 \pm 0,01

Сопоставление индексов сосновых насаждений и их таксационных показателей дало следующие результаты. Наиболее высокая обратная зависимость наблюдается между NDVI и возрастом насаждений с коэффициентом корреляции $-0,85$. Также высокая отрицательная связь прослеживается между NDVI и высотой ($r = -0,71$), запасом насаждений ($r = -0,73$), умеренная — с диаметром насаждений ($r = -0,45$) (табл. 3). Это обусловлено тем, что высота, диаметр и запас являются производными от возраста насаждений.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между вегетационными индексами и таксационными характеристиками насаждений

Таксационные характеристики	Вегетационные индексы			
	NDVI	EVI	SAVI	NDWI
Возраст, лет	$-0,85$	$-0,84$	$-0,87$	$-0,26$
Высота, м	$-0,71$	$-0,71$	$-0,69$	$0,17$
Диаметр, см	$-0,45$	$-0,41$	$-0,47$	$-0,43$
Полнота	$-0,13$	$-0,10$	$-0,09$	$0,02$
Запас, куб. м/га	$-0,73$	$-0,73$	$-0,69$	$0,20$

Описанные связи приобретают почти функциональную зависимость, если исследуемые насаждения сгруппировать по возрастным диапазонам (табл. 4). Тогда коэффициенты корреляции между средними значениями высоты, диаметра и запаса и средними значениями вегетационного индекса приближаются к минус единице.

Таблица 4

Средние таксационные показатели и вегетационные индексы по классам возраста

Возрастной диапазон насаждений, лет	Класс возраста	Средние значения таксационных показателей			Средние значения индексов			
		Высота, м	Диаметр, см	Запас, куб. м/ га	NDVI	EVI	SAVI	NDWI
53—59	III	23,20	25,20	294	0,80	0,82	1,19	0,39
60—67	IV	24,29	27,71	334	0,77	0,74	1,15	0,38
75—82	IV, V	28,50	31	383	0,72	0,61	1,08	0,38

Таким образом, с увеличением класса возраста с III до V средние значения NDVI основных насаждений уменьшаются. Это согласуется с литературными данными, в которых указывается, что с возрастом содержание хлорофилла в хвое снижается и она приобретает желто-зеленую окраску [10; 17].

Однако если рассматривать насаждения внутри возрастных диапазонов, то снижение NDVI не является монотонным. Так, для насаждений 60—67 лет с увеличением возраста индекс NDVI увеличивается. Это можно объяснить, во-первых, влиянием проективного покрытия живого напочвенного покрова, что требует дальнейших полевых исследований. Во-вторых, расположением пробных площадей в разных зонах. Насаждения возраста 60, 62 и 63 года расположены в юго-западной зоне, а 65 и 67 лет — в северной части города (рис. 2).

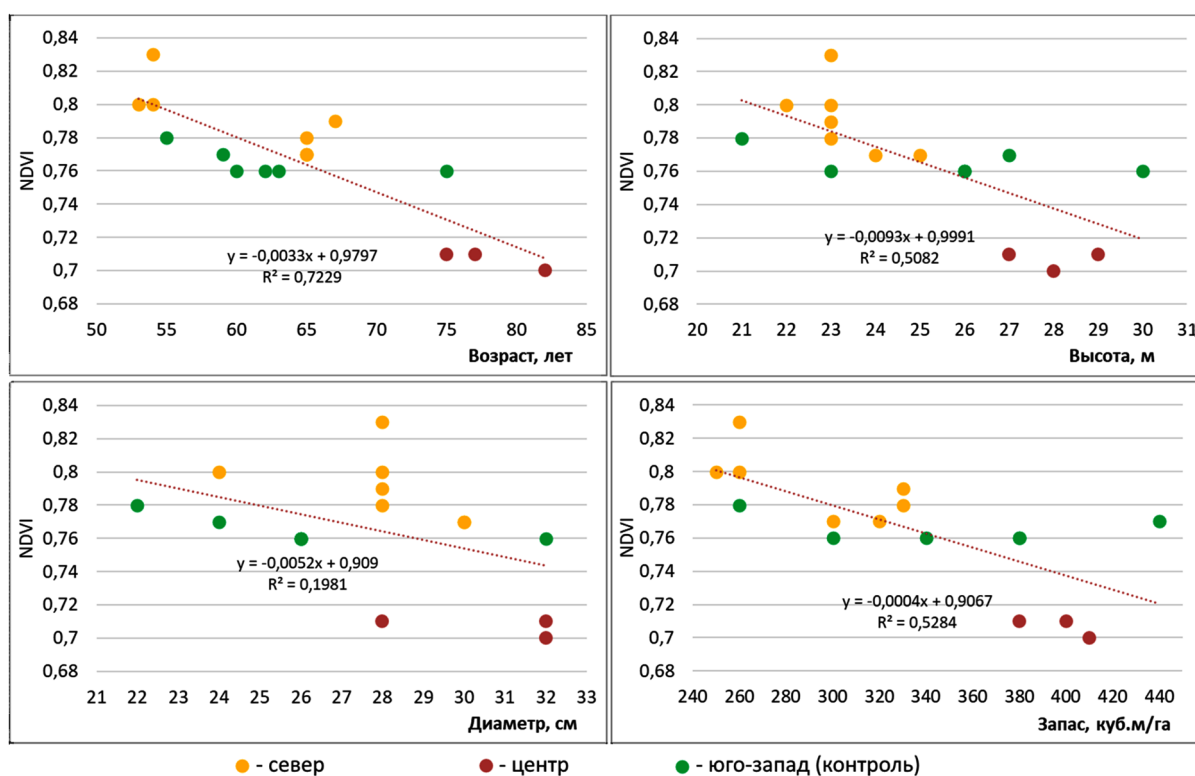


Рис. 2. Взаимосвязи между индексом NDVI и таксационными показателями насаждений

Ввиду высокой зависимости NDVI от возраста насаждений сравнение насаждений по различным зонам города и пригородов становится возможным только по возрастным диапазонам. Сосняки 75-летнего возраста произрастают в центральной части города — в лесопарке (ПП8) и юго-западной — в дендрологическом памятнике природы (ПП11). В центральной зоне индекс NDVI значительно ниже, что объясняется длительной высокой транспортной и рекреационной нагрузкой, сказывающейся на состоянии насаждений. Относительно высокий NDVI на юго-западе свидетельствует о лучшем состоянии сосняков в результате природоохранного статуса территории.

При сравнении насаждений в возрастных диапазонах 53—59 и 60—67 лет в северной зоне индексы NDVI несколько выше, чем в зоне относительного контроля — в юго-западных пригородах (табл. 5). Это соответствует встречающимся в исследованиях фактам, что в условиях слабого нефтехимического загрязнения отмечается превышение содержания хлорофилла в хвое по сравнению с контролем и устойчивое развитие сосновых насаждений. Поэтому сосновые насаждения были введены в санитарно-защитные зоны нефтеперерабатывающих заводов г. Уфы [10].

Таблица 5

Значения вегетационных индексов NDVI по зонам

Возрастной период, лет	Север	Центр	Юго-запад
53—59	0,81	—	0,78
60—67	0,78	—	0,76
75—82	—	0,71	0,76

Этим фактом и объясняется отклонение от общего тренда снижения NDVI в зависимости от возраста при выборке насаждений 60—67 лет.

Диапазоны вегетационных индексов EVI и SAVI шире, чем у NDVI (EVI от 0,54 до 0,99; SAVI — от 1,04 до 1,25), и они тесно с ним коррелируют (рис. 3).

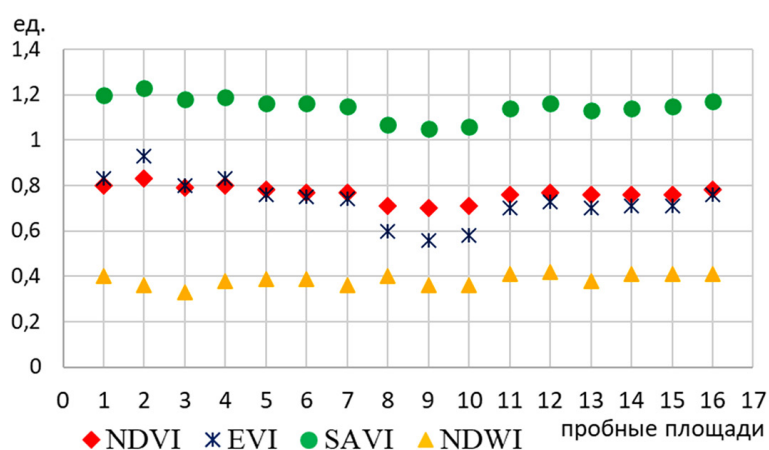


Рис. 3. Значения вегетационных индексов по пробным площадям

Однако из-за более широких диапазонов значения EVI и SAVI выглядят более контрастными и позволяют более четко выявить различия между участками. К тому же широкий диапазон позволяет при необходимости выделить больше градаций внутри диапазона.

NDWI — водный индекс — в целом по снимку колеблется от $-0,41$ до $0,78$. Если сравнивать с NDVI, то наблюдается следующее: на участках с $NDVI = 0,2$ и выше существует положительная корреляционная зависимость между этими двумя индексами, за

исключением непосредственно водных объектов, где высокие значения водного индекса (0,35—0,45) наблюдаются при низких значениях NDVI (рис. 4).

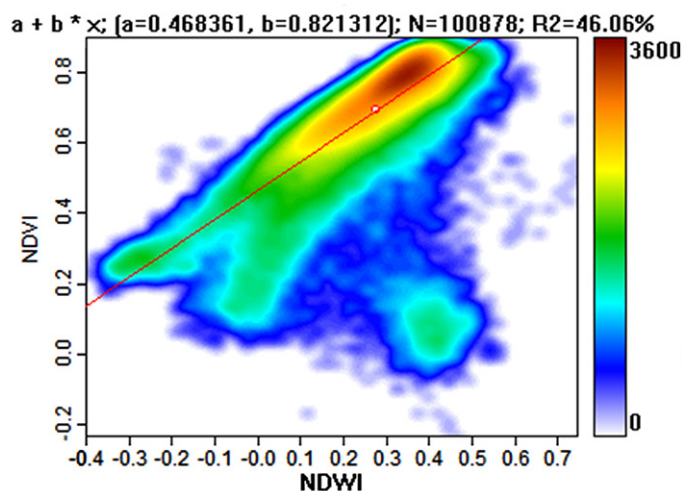


Рис. 4. Взаимосвязь индексов NDVI и NDWI, построенных по снимку

NDWI непосредственно сосновых насаждений колеблется от 0,31 до 0,42. Четкой зависимости NDWI от класса возраста и от других таксационных показателей сосновых насаждений не обнаружено.

Заключение

Вегетационные индексы, построенные по снимку Sentinel-2, демонстрируют взаимосвязи с таксационными характеристиками сосновых средневозрастных насаждений. Индексы NDVI, EVI, SAVI тесно коррелируют с возрастом, высотой и запасом насаждений. С увеличением класса возраста с III до V значения индексов уменьшаются. Колебания в тренде снижения индексов можно объяснить влиянием живого напочвенного покрова и влиянием зоны, в которой расположены пробные площади.

Сравнение индексов по зонам показало, что сосновые насаждения 75-летнего возраста, находящиеся под статусом дендрологического памятника природы в юго-западных пригородах Уфы, имеют значительно более высокие показатели NDVI, чем насаждения того же возраста в лесопарке в центральной части города. Сосняки 50—60-летнего возраста демонстрируют более высокие показатели NDVI в северной части города в зоне нефтехимического загрязнения, чем в зоне контроля, что согласуется с литературными данными.

Совместное применение индексов NDVI, EVI, SAVI позволяет выделять больше градаций в состоянии насаждений, охарактеризовать степень их неоднородности и выделять проблемные участки, в которых снижается содержание хлорофилла. Следующим этапом при сопоставлении этих индексов с характеристиками и состоянием насаждений должны стать полевые исследования, направленные на изучение вклада напочвенного покрова под пологом соснового древостоя.

Индекс NDWI позволяет четко выделять на снимке водные объекты. В отношении сосновых насаждений собранных данных недостаточно для однозначных выводов, нужны дополнительные исследования по обеспеченности растений влагой.

Таким образом, дальнейшее изучение отражательных характеристик лесных насаждений по снимкам высокого пространственного разрешения Sentinel-2 с использованием вегетационных индексов в условиях техногенной нагрузки является перспективным направлением мониторинговых исследований.

Список использованной литературы

1. Атлас Республики Башкортостан. Омск : Омская картограф. фабрика, 2005.
2. Белова Е. И., Ершов Д. В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339—345.
3. Братков В. В., Кравченко И. В., Туаев Г. А., Атаев З. В., Абдулжалимов А. А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия Дагестанского педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10, № 4. С. 97—111.
4. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А. Мониторинг состояния растительного покрова на территории Республики Марий Эл с использованием ENVISAT MERIS // Лесной вестник = Forestry bulletin. 2013. № 7 (99). С. 42—45.
5. Гопп Н. В., Куликова Е. А., Пестунов И. А., Синявский Ю. Н., Смирнов В. В. Распознавание формаций лесной растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками по данным съемки со спутника Landsat 7 ETM+ // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 2. С. 194—201.
6. Гопп Н. В., Смирнов В. В. Использование вегетационного индекса (NDVI) для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2009. Т. 4, № 1. С. 187—191.
7. Гусев А. П. Дистанционные индикаторы деградации лесных геосистем юго-востока Беларуси // Весці БДПУ. Сер. 3. 2020. № 1. С. 46—50.
8. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2019 г. СПб. : Росгидромет, 2020.
9. Жигунова С. Н., Михайленко О. И., Федоров Н. И. Использование данных дистанционного зондирования Земли для анализа влияния городской среды на сезонное развитие древесной растительности // Экология и география растений и растительных сообществ : материалы IV Междунар. науч. конф. Екатеринбург : Гуманитарный ун-т, 2018. С. 286—290.
10. Зайцев Г. А., Кулагин А. Ю. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение: дендрэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование. М. : Наука, 2006. 124 с.
11. Лесохозяйственный регламент Уфимского лесничества Республики Башкортостан. Уфа : Ин-т стратегических исследований Республики Башкортостан, 2018. 198 с.
12. Мячина К. В. Анализ космических изображений с расчетом NDVI для изучения динамики ландшафтного покрова территории нефтяного месторождения в Оренбургской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 4 (42). С. 206—209.
13. Оплетаев А. С., Жигулин Е. В., Косов В. А. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3 (70). С. 15—23.
14. Петрищев В. П., Дубровская С. А., Ряхов Р. В. Сравнительный анализ состояния растительности в г. Оренбурге по результатам обработки мультиспектральных космических снимков // Проблемы региональной экологии. 2014. № 4. С. 213—217.
15. Рахматуллин З. З., Рахматуллина И. Р., Габделхаков А. К., Мартынова М. В., Султанова Р. Р. Динамика NDVI растительного покрова лесопарка им. Лесоводов Башкирии // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг : сб. науч. статей. Йошкар-Ола : Поволжский гос. технол. ун-т, 2019. С. 104—113. DOI: 10.25686/6157.2019.5.58821.
16. Рахматуллина И. Р., Рахматуллин З. З., Исаков Ф. Ф., Серова О. В. Динамика вегетационного индекса NDVI насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях загрязнения Уфимского промышленного центра // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 2 (34). С. 116—117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09.
17. Рысин Л. П., Савельев Л. И. Сосновые леса России. М. : КМК, 2008. 289 с.
18. Стрельников И. И., Глухов А. З., Николаева А. В., Мудрецова К. В. Подготовка цифровых карт для обеспечения экологических исследований в Донбассе // Промышленная ботаника. 2018. Вып. 18, № 3. С. 42—50.
19. Чащин А. Н., Кондратова М. А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. № 2 (49). С. 135—147. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147.
20. Шарый П. А., Шарая Л. С. Изменение NDVI лесных экосистем Северного Кавказа как функция рельефа и климата // Лесоведение. 2014. № 5. С. 83—90.
21. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015. URL: <http://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/gmd-8-1991-2015.html>.
22. Copernicus. Europe's eyes on Earth. URL: <https://www.copernicus.eu/en>.

23. Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
24. Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing Environment. 1996. Vol. 58, N 3. P. 257—266. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00067-3.
25. Huete A. R., Jackson R. D., Post D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds // Remote Sensing of Environment. 1985. Vol. 17, N 1. P. 37—53. DOI: 10.1016/0034-4257(85)90111-7.
26. Huete A. R. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 25, N 3. P. 295—309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
27. Hui Qing Liu, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33, N 2. P. 457—465. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027.
28. Main R., Cho M. A., Mathieu R., O’Kennedy M. M., Ramoelo A., Koch S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. 66, N 6. P. 751—761. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.08.001.
29. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chivkunova O. B., Solovchenko A. E., Pogosyan S. I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments // Russian Journal of Plant Physiology. 2003. Vol. 50, N 5. P. 704—710.
30. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium, 1973. NASA SP-351. P. 309—317.
31. Szabo S., Gácsi Z., Balazs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Landscape & Environment. 2016. Vol. 10, N 3—4. P. 194—202.
32. Xue J., Su B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications // Journal of Sensors. 2017. Vol. 2017. P. 1—17. DOI: 10.1155/2017/1353691.

Поступила в редакцию 27.04.2021

Рахматуллина Ирина Римилевна, кандидат биологических наук, доцент
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а
E-mail: rahmat_irina@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4367-5927

Рахматуллин Загир Забинович, кандидат биологических наук, доцент
Башкирский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34
E-mail: zagir1983@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3223-6726

Тагирова Олеся Васильевна, кандидат биологических наук, доцент
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а
E-mail: olecyi@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1615-7005

Хамидуллина Гульнара Гизаровна, кандидат биологических наук, доцент
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а
E-mail: hamidullina85@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8259-6156

Кулагин Алексей Юрьевич, доктор биологических наук, профессор
Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук
Российская Федерация, 450054, г. Уфа, пр-т Октября, 69
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а
E-mail: coolagin@list.ru
ORCID: 0000-0001-7574-4547

UDC 574.3

I. R. Rakhmatullina**Z. Z. Rakhmatullin****O. V. Tagirova****G. G. Khamidullina****A. Yu. Kulagin****Using vegetation indices to assess the characteristics of pine plantations in Ufa and its suburbs**

On the territory of the Ufa forestry 16 test plots were laid in the plantations of Scots pine, which are more than 50 years old. The test plots are divided into 3 groups: a control zone, a zone with a predominance of petrochemical pollution, and a zone with high traffic and recreational load. Based on the Sentinel-2 image, rasters of vegetation indices were constructed: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), and their characteristics were given. For each trial plot, the average values of these indices were obtained and analyzed. The interrelations of the NDVI, EVI, SAVI indices with the state and age of the plantings have been established, which makes it possible to distinguish stands in which the chlorophyll content decreases. The combined use of these indices makes it possible to distinguish more gradations in the state of plantations and to characterize the degree of their heterogeneity. There is no clear dependence of NDWI on the state of pine plantations, since additional studies are needed on the supply of plants with moisture.

Key words: Scots pine, Sentinel-2 satellite image, NDVI, SAVI, EVI, NDWI.

Rakhmatullina Irina Rimilevna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla
Russian Federation, 450008, Republic of Bashkortostan, Ufa, ul. Otyabr'skoy Revolutsii, 3a
E-mail: rahmat_irina@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4367-5927

Rakhmatullin Zagir Zabirovich, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
Bashkir State Agrarian University
Russian Federation, 450001, Republic of Bashkortostan, Ufa, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34
E-mail: zagir1983@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3223-6726

Tagirova Olesya Vasilyevna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla
Russian Federation, 450008, Ufa, ul. Otyabr'skoy Revolutsii, 3a
E-mail: olecyi@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1615-7005

Khamidullina Gulnara Gizarovna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla
Russian Federation, 450008, Ufa, ul. Otyabr'skoy Revolutsii, 3a
E-mail: hamidullina85@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8259-6156

Kulagin Aleksey Yurievich, Doctor of Biological Sciences, Professor
Ufa Institute of Biology of Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, 450054, Ufa, pr-t Oktyabrya, 69
Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla
Russian Federation, 450008, Ufa, ul. Otyabr'skoy Revolutsii, 3a
E-mail: coolagin@list.ru
ORCID: 0000-0001-7574-4547

References

1. *Atlas Respubliki Bashkortostan* [Atlas of the Republic of Bashkortostan]. Omsk, Omskaya kartograf. fabrika Publ., 2005. (In Russian)
2. Belova E. I., Ershov D. V. Opyt otsenki estestvennogo lesovosstanovleniya na sploshnykh vyrubkakh po vremennym ryadam Landsat [Assessing reforestation on clear cuts based on Landsat time series]. *Lesovedenie — Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 5, pp. 339—345. (In Russian)
3. Bratkov V. V., Kravchenko I. V., Tuaeov G. A., Ataev Z. V., Abdulzhalimov A. A. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlya kartografirovaniya landshaftov Bol'shogo Kavkaza [Application of vegetation indices for mapping the landscapes of the Greater Caucasus]. *Izvestiya Dagestanskogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 97—111. (In Russian)
4. Vorob'ev O. N., Kurbanov E. A. Monitoring sostoyaniya rastitel'nogo pokrova na territorii Respubliki Marii El s ispol'zovaniem ENVISAT MERIS [Monitoring the state of vegetation on the territory of the Mari El Republic using ENVISAT MERIS]. *Lesnoi vestnik — Forestry Bulletin*, 2013, no. 7 (99), pp. 42—45. (In Russian)
5. Gopp N. V., Kulikova E. A., Pestunov I. A., Sinyavskii Yu. N., Smirnov V. V. Raspoznavanie formatsii lesnoi rastitel'nosti s blizkimi spektral'no-yarkostnymi kharakteristikami po dannym s'emki so sputnika Landsat 7 ETM+ [Recognition of forest vegetation formations with similar spectral-brightness characteristics based on imagery data from the Landsat 7 ETM+ satellite]. *Vychislitel'nye tekhnologii — Computational Technologies*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 194—201. (In Russian)
6. Gopp N. V., Smirnov V. V. Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya otsenki zapasov nadzemnoi fitomassy tundrovnykh soobshchestv rastenii [Use of the vegetation index (NDVI) for estimation the above-ground biomass in Tundra plant communities]. *Interesko Geo-Sibir'*, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 187—191. (In Russian)
7. Gusev A. P. Distsionnyye indikatory degradatsii lesnykh geosistem yugo-vostoka Belarusi [Remote indicators of degradation of forest geosystems in the South-East of Belarus]. *Vesti BDPU*, Ser. 3. 2020, no. 1, pp. 46—50. (In Russian)
8. *Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2019 g.* [Yearbook of the state of air pollution in cities on the territory of Russia for 2019]. St. Petersburg, Rosgidromet Publ., 2020. (In Russian)
9. Zhigunova S. N., Mikhailenko O. I., Fedorov N. I. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya analiza vliyaniya gorodskoi sredy na sezonnoe razvitie drevesnoi rastitel'nosti [Using Earth Remote Sensing Data to Analyze the Impact of the Urban Environment on the Seasonal Development of Woody Vegetation]. *Ekologiya i geografiya rastenii i rastitel'nykh soobshchestv: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. [Ecology and Geography of Plants and Plant Communities. Proceedings of the IV Internat. sci. conf.]*. Yekaterinburg, Gumanitarnyi un-t Publ., 2018, pp. 286—290. (In Russian)
10. Zaitsev G. A., Kulagin A. Yu. *Sosna obyknovennaya i neftekhimicheskoe zagryaznenie: dendroekologicheskaya kharakteristika, adaptivnyi potentsial i ispol'zovanie* [Scots pine and petrochemical pollution: dendroecological characteristics, adaptive potential and use]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 124 p. (In Russian)
11. *Lesokhozyaistvennyi reglament Ufimskogo lesnichestva Respubliki Bashkortostan* [Forestry regulations of the Ufa forestry of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, In-t strategicheskikh issledovaniy Respubliki Bashkortostan Publ., 2018. 198 p. (In Russian)
12. Myachina K. V. Analiz kosmicheskikh izobrazhenii s raschetom NDVI dlya izucheniya dinamiki landshaftnogo pokrova territorii neftyanogo mestorozhdeniya v Orenburgskoi oblasti [Analysis of satellite images with calculation of NDVI for studying the dynamics of landscape cover of the oil fields territory in the Orenburg region]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 4 (42), pp. 206—209. (In Russian)
13. Opletaev A. S., Zhigulin E. V., Kosov V. A. Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa NDVI dlya otsenki sostoyaniya lesnykh nasazhdenii na narushennykh zemlyakh [Using the NDVI vegetation index to assess the state of forest plantations on disturbed land]. *Les Rossii i khozyaistvo v nikh*, 2019, no. 3 (70), pp. 15—23. (In Russian)
14. Petrishchev V. P., Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V. Sravnitel'nyi analiz sostoyaniya rastitel'nosti v g. Orenburge po rezul'tatam obrabotki mul'tispektral'nykh kosmicheskikh snimkov [A comparative analysis of the vegetation in the Orenburg city on the results of the processing of multispectral space images]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2014, no. 4, pp. 213—217. (In Russian)
15. Rakhmatullin Z. Z., Rakhmatullina I. R., Gabelkhaikov A. K., Martynova M. V., Sultanova R. R. Dinamika NDVI rastitel'nogo pokrova lesoparka im. Lesovodov Bashkirii [Dynamics of NDVI vegetation cover in the forest park named after Foresters of Bashkiria]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring: sbornik nauch. statei* [Forest ecosystems in conditions of climate

change: biological productivity and remote monitoring. Collect. of sci. articles]. Ioshkar-Ola, Povolzhskii gos. tekhnol. un-t Publ., 2019, pp. 104—113. DOI: 10.25686/6157.2019.5.58821. (In Russian)

16. Rakhmatullina I. R., Rakhmatullin Z. Z., Iskhakov F. F., Serova O. V. Dinamika vegetatsionnogo indeksa NDVI nasazhdenii sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh zagryazneniya Ufimskogo promyshlennogo tsentra [Dynamics of the NDVI vegetation index of pine forest plantations (Pinus sylvestris L.) under pollution in industrial center of Ufa]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2019, no. 2 (34), pp. 116—117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09. (In Russian)

17. Rysin L. P., Savel'ev L. I. *Sosnovye lesa Rossii* [Pine forests of Russia]. Moscow, KMK Publ., 2008. 289 p. (In Russian)

18. Strel'nikov I. I., Glukhov A. Z., Nikolaeva A. V., Mudretsova K. V. Podgotovka tsifrovyykh kart dlya obespecheniya ekologicheskikh issledovaniy v Donbasse [The digital maps preparation for support of ecological research in Donbass]. *Promyshlennaya botanika*, 2018, is. 18, no. 3, pp. 42—50. (In Russian)

19. Chashchin A. N., Kondratova M. A. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya otsenki tempov samozarastaniya ugol'nykh otvalov Kizelovskogo basseina [Using remote sensing data to assess the self-overgrowth rates of coal dumps in the Kizel basin]. *Geograficheskii vestnik — Geographical Bulletin*, 2019, no. 2 (49), pp. 135—147. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147. (In Russian)

20. Sharyi P. A., Sharaya L. S. Izmenenie NDVI lesnykh ekosistem Severnogo Kavkaza kak funktsiya rel'efa i klimata [Change in NDVI of forest ecosystems in Northern Caucasus as a function of topography and climate]. *Lesovedenie — Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 5, pp. 83—90. (In Russian)

21. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015. Available at: <http://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/gmd-8-1991-2015.html>.

22. Copernicus. *Europe's eyes on Earth*. Available at: <https://www.copernicus.eu/en>.

23. Copernicus Open Access Hub. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/>

24. Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environment*, 1996, vol. 58, no. 3, pp. 257—266. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00067-3.

25. Huete A. R., Jackson R. D., Post D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 1985, vol. 17, no. 1, pp. 37—53. DOI: 10.1016/0034-4257(85)90111-7.

26. Huete A. R. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, vol. 25, no. 3, pp. 295—309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.

27. Hui Qing Liu, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, vol. 33, no. 2, pp. 457—465. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027.

28. Main R., Cho M. A., Mathieu R., O'Kennedy M. M., Ramoelo A., Koch S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, vol. 66, no. 6, pp. 751—761. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.08.001.

29. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chivkunova O. B., Solovchenko A. E., Pogosyan S. I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 50, no. 5, pp. 704—710.

30. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *3rd ERTS Symposium*, 1973. NASA SP-351, pp. 309—317.

31. Szabo S., Gács Z., Balazs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Landscape & Environment*, 2016, vol. 10, no. 3—4, pp. 194—202.

32. Xue J., Su B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017, pp. 1—17. DOI: 10.1155/2017/1353691.