

Научная статья

УДК 504.064

DOI: 10.15372/ChUR2025649

EDN: HJJOZ

## **Взаимосвязь значений вегетационных индексов NDVI и EVI с содержанием пигментов в растениях на экологически нарушенных и чистых участках**

Ю. В. САВИНЫХ <sup>✉</sup>, Т. О. ПЕРЕМИТИНА, С. П. ЗАДОРЖНЫХ

*Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия*

*E-mail: yu-sav2007@yandex.ru<sup>✉</sup>, pto@ipc.tsc.ru, sony473949@mail.ru*

### **Аннотация**

Проведена оценка зависимости вегетационных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI (Enhanced Vegetation Index) от содержания пигментов в растениях на трех объектах с экологическими нарушениями участков земной поверхности: на территории разлива дизельного топлива, в районе естественного нефтепроявления и на участке после пожара. Проведенные исследования показали, что устойчивость к загрязнению нефтепродуктами исследованных видов растений возрастает в ряду: осока < злаки < полевой хвощ < ива < мох. Определение взаимосвязи между дистанционно измеренными оптическими характеристиками растительного покрова и концентрациями пигментов выявило наличие прямой зависимости индексов NDVI и EVI от концентрации пигментов в хвоще и злаках и обратной зависимости для ивы, мха и осоки. В районе естественного нефтепроявления в условиях загрязнения нефтью наблюдается значительное снижение суммы хлорофиллов по сравнению с контрольными условиями для земляники, полыни, тимьяна. На постпирогенном участке обнаружено снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов в черемухе и увеличение содержания пигментов в бузине, что свидетельствует о более высокой устойчивости бузины к воздействию высоких температур. Вегетационные индексы на постпирогенном участке значительно ниже, чем на фоновом (экологически чистом) участке.

**Ключевые слова:** дизельное топливо, нефть, растения, пигменты, спутниковые данные, вегетационные индексы

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500046-7).

**Благодарности:** авторы благодарят сотрудника Тобольской комплексной научной станции УрО РАН Попову Е. И. за отбор и передачу образцов растений с фоновых и пирогенных участков.

**Для цитирования:** Савиных Ю. В., Перемитина Т. О., Задоржных С. П. Взаимосвязь значений вегетационных индексов NDVI и EVI с содержанием пигментов в растениях на экологически нарушенных и чистых участках // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 2. С. 249–255. DOI: 10.15372/ChUR2025649. EDN: HJJOZ.

Original article

## Interrelation of vegetation indices NDVI and EVI with pigment content in plants over disturbed and intact regions

YU. V. SAVINYKH <sup>✉</sup>, T. O. PEREMITINA, S. P. ZADOROZHNYKH*Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia**E-mail: yu-sav2007@yandex.ru<sup>✉</sup>, pto@ipc.tsc.ru, sony473949@mail.ru*

### Abstract

The dependence of vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index) on the content of pigments in plants was studied at three sites with environmental disturbance: at the territory of diesel fuel spill, in the region of natural oil occurrence, and at a post-fire site. The studies have shown that the stability of plant species against pollution with petroleum products increases in the sequence: sedge < cereals < field horsetail < willow < moss. Determination of interrelation between remotely measured optical characteristics of the vegetation cover and the concentrations of pigments revealed a direct dependence of NDVI and EVI values on the concentrations of pigments in field horsetail and cereals, and inverse dependence for willow, moss, and sedge. In the region of natural oil occurrence under the conditions of pollution with oil, a substantial decrease in total chlorophyll content is observed for wild strawberry, artemisia, and thyme in comparison with the reference conditions. A decreased content of chlorophylls and carotenoids was detected at the post-fire site in padus, and an increased pigment content in dwarf elder, which provides evidence of the higher stability of dwarf elder to the action of high temperatures. The vegetation indices at the post-fire site are substantially lower than at the background (intact) site.

**Keywords:** diesel fuel, petroleum, plants, pigments, satellite data, vegetation indices

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке и эксплуатации нефтегазового комплекса большое внимание уделяется прогнозированию чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий разливов нефти [1]. Наибольшее влияние нефть оказывает на живые компоненты экосистем [2]. Так, нефтезагрязнение может негативно воздействовать на растения (вызывать нарушение метаболизма, замедление роста и гибель) за счет прямого токсического действия или косвенного влияния через ухудшение аэрации и водного режима почвы [3].

Визуально заметные морфологические изменения растений под действием нефтезагрязнений сопровождаются отклонением биохимических показателей, в частности изменением содержания фотосинтезирующих пигментов – хлорофиллов, каротиноидов, антоцианов. Их концен-

трация под влиянием нефтезагрязнения в растениях чаще снижается, что подтверждено для разных типов почв и климатических зон [4]. Однако воздействие нефтезагрязнения почв на жизнедеятельность растений может носить и позитивный характер. Например, некоторыми исследователями отмечалось стимулирующее действие нефти на рост растений [5].

Основным способом определения содержания фотосинтетических пигментов в растениях считается спектрофотометрический [6]. Наряду с этим методом широкое применение нашел метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), впервые описанный в [7]. Он основан на контрасте между максимальным поглощением в красном диапазоне из-за пигментов хлорофилла и максимальным отражением в инфракрасном диапазоне, вызванным клеточной структурой листа. Наиболее известным и широко используе-

мым индексом жизнеспособности растительности является нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В ряде работ показана корреляция NDVI с содержанием хлорофилла в сельскохозяйственных культурах [8–12]. Анализ данных по исследованию на озимой пшенице показал, что коэффициент корреляции между вегетационными индексами и относительным содержанием хлорофилла в среднем по всем изученным полям за годы исследований составляет 0.79. Это свидетельствует о достаточно высокой степени сопряжения NDVI с количеством фотосинтетических пигментов в органах растений озимой пшеницы [12].

Метод ДЗЗ широко используется для анализа растительного покрова после пожаров [13–15]. Проведенными исследованиями установлено, что низовые пожары заметно повлияли на содержание хлорофилла. На всех исследованных секциях после низовых пожаров количество хлорофилла в хвое поврежденных сосен значительно ниже, чем на контрольных (экологически чистых или так называемых фоновых) участках, и при низовых пожарах сильной интенсивности достигает 69–73 %, при слабой интенсивности – 81–88 % от контрольного значения. Такая же закономерность наблюдалась и по содержанию каротиноидов.

Для анализа растительности при нефтяных загрязнениях местности также используют метод ДЗЗ [16, 17]. Были определены минимальные и максимальные значения индекса для исследуемых территорий, а также выявлены тенденции увеличения его значений за 10-летний период, что свидетельствует о процессе восстановления растительного покрова, его неугнетенном состоянии и улучшении экологической обстановки нефтедобывающих территорий. Авторы отмечают, что для верификации полученных данных необходимо проведение наземных исследований растительного покрова. Сочетание наземных и спутниковых данных позволит усовершенствовать методику оценки состояния растительного покрова и расширить возможности ее применения на других территориях [17].

Цель работы – определение корреляционных связей между дистанционно измеренными вегетационными индексами растительного покрова и количественным содержанием пигментов на экологически нарушенных и чистых участках земной поверхности.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Объекты исследования

Исследование влияния содержания пигментов в растениях на значение вегетационных индексов NDVI, EVI (Enhanced Vegetation Index) проводилось на трех объектах.

**Территория разлива дизельного топлива.** В окрестностях г. Норильска 29.05.2020 г. произошло катастрофическое крупномасштабное событие: разлив дизельного топлива (ДТ) в результате разгерметизации резервуара на ТЭЦ-3 в Кайеркане. Приблизительно 6.3 тыс. т попали в грунт и 15.4 тыс. т в реку Амбарная и ее истоки, а также многие ручьи, связанные с рекой [18]. Через два месяца после аварии экспедицией Института химии нефти СО РАН (Томск) были отобраны образцы растений с областей разлива дизельного топлива и фоновых (экологически чистых) территорий.

На местах разлива ДТ (ручей Надеждинский, реки Далдыкан и Амбарная, истоки р. Пясины) и на фоновых участках исследованы нижеперечисленные растения в следующих координатах:

полевой хвощ (*Equisetum arvense*), фон – 69.325642 N, 87.922644 E, разлив ДТ – 69.331561 N, 87.909352 E, ручей Надеждинский;

ива (*Salix vitaminalis*), фон – 69.343628 N, 87.863732 E, разлив ДТ – 69.344742 N, 87.860995 E, р. Далдыкан;

злаки (*Deschampsia cespitosa*), фон – 69.387622 N, 87.743853 E, разлив ДТ – 69.461950 N, 87.927200 E, р. Амбарная;

мох (*Campyllum stellatum*), фон – 70.086972 N, 88.146722 E, разлив ДТ – 70.092278 N, 88.145139 E, истоки р. Пясины;

осока (*Carex aquatilis*), фон – 69.325642 N, 87.922644 E, разлив ДТ – 69.481033 N, 88.447117 E, р. Амбарная.

**Район естественного нефтепроявления.** На территории нефтепроявления “Сохокул” в Северной Хакасии и фоновом участке 23.07.2024 г. отобраны пробы растений: земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), скабиоза бледно-желтая (*Scabiosa ochroleuca* L.), полынь холодная (*Artemisia frigida* Willd.), тимьян ползучий (*Thymus serpyllum*). Координаты участка с нефтепроявлением – 54.46460 N, 89.90111 E, фонового участка – 54.46444 N, 89.90467 E.

**Постпирогенный район.** На территории лесной зоны вблизи г. Тобольска (Тюменская обл.) 10.07.2023 г. в зоне пожара и на фоновом участке были отобраны пробы растений: черемуха

обыкновенная (*Prunus padus*), бузина черная (*Sambucus nigra*). Координаты постпирогенного участка – 58.352343 N, 68.357856 E, фонового участка – 58.347327 N, 68.383461 E.

#### Методы исследования

Выделение пигментов растений проводили экстракцией этанолом с последующим определением их концентраций спектрофотометрическим методом. Навеску сухих листьев растений 0.2 г помещали в фарфоровую ступку, добавляли 0.1 г песка, 0.1 г мела и 3–4 см<sup>3</sup> этанола. Смесь перетирали, полученный экстракт отфильтровывали на фильтре Шотта. Экстракцию проводили несколько раз до получения бесцветного раствора. Объединенный экстракт переносили в мерную колбу на 25 мл, добавляя этанол до метки. Количественное определение хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов осуществляли по изменению оптической плотности экстракта пигментов на спектрофотометре СФ-56 (ОКБ “Спектр”, Россия) при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения хлорофиллов (*a*, 663 нм и *b*, 645 нм) и максимуму поглощения каротиноидов (*k*, 440.5 нм) с последующим расчетом концентрации пигментов по уравнениям [19]:

$$C_a = 13.7D_{665} - 5.7D_{649} \quad (1)$$

$$C_b = 25.8D_{649} - 7.6D_{665} \quad (2)$$

$$C_k = 4.695D_{441} - 0.268(C_a + C_b) \quad (3)$$

где  $C_a$ ,  $C_b$  – концентрации хлорофилла *a* и *b* соответственно, мг/г;  $C_k$  – концентрация каротиноидов, мг/г;  $D$  – оптическая плотность растворов при заданной длине волны.

Для оценки состояния растительности по данным мультиспектрального ДЗЗ наиболее популярным является нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI [7], рассчитываемый по значениям отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (4)$$

где  $\rho_{nir}$ ,  $\rho_{red}$  – спектральные яркости поверхности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно.

Однако, как отмечается в работах многих авторов [20, 21], NDVI чувствителен к фоновому отражению, что ограничивает применение данного индекса. В качестве альтернативы NDVI используется усовершенствованный вегетационный индекс EVI, в расчетах которого учитываются значения спектральной яркости поверхности в синем диапазоне волн, при этом влия-

ние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизированы [22]. Расчет вегетационного индекса EVI выполняется по формуле:

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + C_1)(\rho_{red} - C_2)(\rho_{blue} + L)} (1 + L) \quad (5)$$

где  $\rho_{blue}$  – спектральная яркость поверхности в синем диапазоне;  $L$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы;  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты аэрозольной устойчивости, используемые синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале. Диапазон значений индекса от –1 до +1. Для зеленой растительности индекс изменяется от 0.2 до 0.8.

В данной работе проведена оценка состояния растительного покрова по спутниковым данным MODIS – 16-дневным композитам с пространственным разрешением 250 м, содержащим значения NDVI и EVI. В научно-исследовательском центре Института химии нефти СО РАН сформирована и регулярно пополняется коллекция спутниковых данных Terra/MODIS.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

##### Территория разлива дизельного топлива

Лабораторные исследования (табл. 1) показали, что на территории разлива дизельного топлива полевой хвощ не реагирует на загрязнение. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях хвоща, произрастающего на загрязненной почве, остается примерно на том же уровне, что и у растений чистого фонового участка. Наиболее чувствительными к загрязнению оказались осока и злаки. У осоки значительно снижается содержание в листьях как хлорофиллов, так и каротиноидов, по сравнению с аналогичными показателями у контрольных растений (чистого фона). При этом сумма хлорофиллов снижается на 31 % по сравнению с фоновыми значениями, а каротиноидов – на 35 %. У злаков сумма хлорофиллов в листьях снизилась на 53, а каротиноидов – на 52 %. Наиболее устойчивыми растениями оказались ива и мох. У ивы наблюдается увеличение содержания суммы хлорофиллов на 117, а каротиноидов – на 66 %. Самые высокие показатели зафиксированы для мха. Сумма хлорофиллов увеличилась на 189, а каротиноидов – на 220 %. Вероятно, нефтяное загрязнение стимулирует выработку пигментов фотосинтеза в таких растениях, как ива и мох. Проведенные исследования показали, что устойчивость к загрязнению нефтепродуктами исследованных ви-

дов растений возрастает в ряду: осока < злаки < полевой хвощ < ива < мох.

Определение взаимосвязи между дистанционно измеренными оптическими характеристиками растительного покрова и концентрациями пигментов показало наличие прямой зависимости индексов NDVI и EVI от содержания пигментов в хвоще и злаках, что соответствует ожидаемым результатам, поскольку эти индексы обычно коррелируют с содержанием хлорофилла и каротиноидов. Для ивы, мха и осоки наблюдается обратная зависимость. Это может быть связано с такими факторами, как преобладание других видов растительности на данной местности или специфические реакции озноженных растений на загрязнение.

#### Район естественного нефтепроявления

Проведенные исследования показали, что нефть оказывает негативное воздействие на фотосинтетические пигменты растений, включая хлорофиллы *a* и *b*, а также каротиноиды (табл. 2). Эти изменения проявляются по-разному у каждого из растений, но имеют общие тенденции. Так, в землянике, полыни, чабреце наблюдается значительное снижение суммы хлорофиллов в условиях загрязнения нефтью по сравнению с контрольными условиями. Это снижение указывает на разрушение фотосинтетического механизма, что негативно сказывается на общей активности растений в отношении пигментов. Так, у земляники концентрация суммы хлорофиллов снизилась на 50, у полыни – на 45, у тимьяна – на 59 %. Для скабиозы, наоборот, нефть оказывает стимулирующий эффект – содержание суммы хлорофиллов увеличивается на 34, а каротиноидов – на 7 %. В остальных

ТАБЛИЦА 1

Содержание пигментов в растениях и вегетационные индексы территорий разлива дизельного топлива (ДТ) и фоновых участков

Растение/ территория	$C_a + C_b$	Каротиноиды	Вегетационный индекс	
			NDVI	EVI
Осока/фон	0.48	0.14	0.5345	0.2685
Осока/ДТ	0.15	0.05	0.5658	0.2387
Злаки/фон	0.84	0.25	0.6266	0.3514
Злаки/ДТ	0.45	0.13	0.5795	0.2521
Хвощ/фон	0.14	0.03	0.5345	0.2685
Хвощ/ДТ	0.13	0.03	0.2135	0.2605
Ива/фон	0.52	0.14	0.4865	0.1987
Ива/ДТ	0.61	0.21	0.4781	0.1777
Мох/фон	0.19	0.05	0.7739	0.4821
Мох/ДТ	0.36	0.11	0.7709	0.4475

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3:  $C_a + C_b$  – суммарная концентрация хлорофиллов *a* и *b*.

растениях содержание каротиноидов снижается: в землянике – на 50, полыни – на 29, тимьяне – на 62 %. Значения вегетационных индексов уменьшаются в районе нефтепроявления по сравнению с фоном.

#### Постпирогенный район

Были проведены исследования растений, произрастающих на территориях после пожаров (табл. 3). Установлено, что на фоновом участке черемуха сохраняет высокое содержание хлорофиллов (1.02 мг/г) по сравнению с постпирогенным участком (0.57 мг/г). Это связано с тем, что черемуха на фоновом участке, который не подвергался пирогенному воздействию, способна поддерживать более высокую фотосинтети-

ТАБЛИЦА 2

Содержание пигментов в растениях и вегетационные индексы района нефтепроявления

Растение	$C_a + C_b$	Каротиноиды	Вегетационный индекс	
			NDVI	EVI
<b>Фоновый участок</b>				
Земляника	1.38	0.32	0.7242	0.4564
Скабиоза бледно-желтая	1.65	0.38	0.7242	0.4564
Полынь холодная	1.44	0.34	0.7242	0.4564
Тимьян ползучий	1.63	0.37	0.7242	0.4564
<b>Район нефтепроявления</b>				
Земляника	0.69	0.16	0.6942	0.4264
Скабиоза бледно-желтая	1.76	0.41	0.6942	0.4264
Полынь холодная	0.99	0.24	0.6942	0.4264
Тимьян ползучий	0.66	0.14	0.6942	0.4264

ТАБЛИЦА 3

Содержание пигментов в растениях и вегетационные индексы постпирогенного района (ПП)

Растение/район	$C_a + C_b$	Каротиноиды	Вегетационный индекс	
			NDVI	EVI
Черемуха/фон	1.02	0.33	0.7727	0.545
Черемуха/ПП	0.57	0.18	0.7727	0.545
Бузина/фон	0.60	0.18	0.7004	0.137
Бузина/ПП	1.16	0.35	0.7004	0.137

ческую активность. Содержание каротиноидов в черемухе на фоновом участке также выше (0.33 мг/г) в сравнении с постпирогенной территорией (0.18 мг/г). Снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов в черемухе на постпирогенном участке можно рассматривать как индикатор фотосинтетического “стресса”. В отличие от черемухи, бузина на участке после пожара демонстрирует высокое содержание хлорофиллов (1.16 мг/г) по сравнению с фоновым участком (0.6 мг/г). Содержание каротиноидов у этого растения на постпирогенном участке также выше (0.35 мг/г), чем на контрольном участке (0.18 мг/г). В случае бузины пожар привел к стимуляции защитных механизмов, что выражается в увеличении содержания как хлорофиллов, так и каротиноидов. Это свидетельствует о том, что бузина обладает более сильным адаптационным механизмом к негативным последствиям пожара, который позволяет ей активно восстанавливать фотосинтетическую активность.

Вегетационный индекс (NDVI) используется для оценки плотности и благополучия растительного покрова. Этот индекс варьируется от -1 до +1, где более высокие значения указывают на более плотную и здоровую растительность. На постпирогенном участке NDVI составляет 0.7004, что ниже показателя для фонового участка (0.7727). Это связано с тем, что пожар уничтожил часть растительности и плотность растительного покрова снижается. Тем не менее значение NDVI на постпирогенном участке достаточно высокое. Это свидетельствует о восстановлении фотосинтетического потенциала за счет активного роста молодых растений. Следует отметить, что значение индекса EVI на постпирогенном участке (0.137) намного ниже, чем на фоновом участке (0.545). Это свидетельствует о том, что структурные изменения растительности на участке после пожара значи-

тельны. Несмотря на частичное восстановление растительности, ее структура и плотность еще далеко не такие, как на неповрежденном фоновом участке. На фоновом участке растительность намного более густая и стабильная, чем на участке после воздействия пожара.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный подход к исследованию содержания пигментов в растениях на экологически нарушенных территориях, основанный на применении как наземных, так и спутниковых данных, позволил выявить зависимости между анализируемыми параметрами (концентрациями хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов и индексами NDVI, EVI). На основании полученных результатов показано наличие прямой зависимости значений индексов NDVI и EVI от концентрации пигментов в хвое и злаках. Для ивы, мха и осоки наблюдается обратная зависимость, что может быть связано с такими факторами, как преобладание других видов растительности или специфические реакции этих растений на загрязнение.

Для района естественного нефтепроявления показано, что нефть значительно угнетает фотосинтетические процессы и снижает содержание ключевых пигментов в растениях, таких как земляника, полынь, тимьян. В отличие от этих растений скабиоза демонстрирует способность адаптироваться к “стрессу”. Это важное свойство, которое указывает на возможное использование мха, ивы, скабиозы для рекультивации загрязненных нефтью территорий.

На постпирогенном участке пожар приводит к снижению содержания хлорофиллов и каротиноидов в черемухе, что можно рассматривать как индикатор фотосинтетического “стресса”. В отличие от черемухи, в бузине на постпирогенном участке установлено высокое содержание хлорофиллов по сравнению с фоновым участком. Бузина обладает более сильными адаптационными механизмами к последствиям пожара, что позволяет ей активно восстанавливать фотосинтетическую активность. Индекс NDVI на постпирогенном участке ниже, чем на фоновом участке. Это указывает на снижение плотности растительного покрова после пожара. Тем не менее значение NDVI на постпирогенном участке незначительно отличается от такового на фоновой территории, что связано, скорее всего, с восстановлением растительности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Махутов Н. А., Лебедев М. П., Большаков А. М., Захарова М. И., Глязнецова Ю. С., Зуева И. Н., Чалая О. Н., Лифшиц С. Х. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса и ликвидация последствий аварийных разливов нефтепродуктов в арктических климатических условиях // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4 (24). С. 90–99.
2. Телятников М. Ю. Изменение фиторазнообразия природных экосистем, испытывающих влияние нефтепродуктов в Норильском промышленном районе // Сибирский экол. журн. 2022. Т. 29, № 2. С. 202–221.
3. Околелова А. А., Мерзлякова А. С., Герман Н. В. Фитотоксичность нефтезагрязненных почв // Естественно-гуманитарные исследования. 2014. № 1 (3). С. 26–31.
4. Arellano P., Tansey K., Balzter H., Tellkamp M. Plant family-specific impacts of petroleum pollution on biodiversity and leaf chlorophyll content in the Amazon rainforest of Ecuador // PLoS One. 2017. Vol. 12, No. 1. Art. e0169867.
5. Корчагина Л. Е. Функциональные особенности растений верховых болот в условиях нефтяного загрязнения на территории Среднего Приобья // Вестн. Нижневартского гос. ун-та. 2015. № 1. С. 14–21.
6. Глаз Н. В., Казакова Н. И., Уфимцева Л. В. Методические подходы к выбору условий пробоотбора и оценке содержания хлорофилла в листьях растений кукурузы // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 3 (102). С. 73–77.
7. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Proceedings, Dec. 10–14, 1973. Vol. 1. Technical Presentations, Section A. Washington: NASA, 1974. P. 309–317.
8. Якушев В. П., Канаш Е. В., Русаков Д. В., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Блохин Ю. И., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57, № 1. С. 98–112.
9. Тугуз Р. К., Панеш А. Х. Использование веб-сервисов геоинформационных систем при возделывании озимой пшеницы // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. 2017. № 11-1. С. 118–123.
10. Kizilgeci F., Yildirim M., Islam M. S., Ratnasekera D., Iqbal M. A., Sabagh A. E. Normalized difference vegetation index and chlorophyll content for precision nitrogen management in durum wheat cultivars under semi-arid conditions // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 7. Art. 3725.
11. Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation // Agric. For. Meteorol. 2008. Vol. 148, No. 8–9. P. 1230–1241.
12. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О. Связь вегетационного индекса NDVI с содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы // Аграр. вестн. Урала. 2018. № 4 (171). С. 10–16.
13. Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на многоспектральных спутниковых данных // Сибирский экол. журн. 2020. Т. 27, № 1. С. 129–140.
14. Гуняженко И. В. Влияние низовых пожаров на содержание хлорофилла и питательных веществ в хвое сосны обыкновенной // Лесоведение и лесное хозяйство: сб. науч. тр. Вып. 5. Минск: Вышэйшая школа, 1972. С. 21–24.
15. Усенья В. В., Чурило В. С. Исследование влияния низовых пожаров на динамику содержания хлорофилла и основных элементов питания в хвое сосновых насаждений // Сборник научных трудов Института леса НАН Беларуси. Вып. 53. Проблемы лесоведения и лесоводства. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2001. С. 186–189.
16. Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Анализ состояния растительного покрова нефтедобывающих комплексов Томской области // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28, № 3. С. 288–293.
17. Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Дистанционный мониторинг экологического состояния нефтедобывающих территорий Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27, № 1. С. 53–57.
18. Разлив дизельного топлива в Норильске / Википедия: сайт. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Разлив\\_дизельного\\_топлива\\_в\\_Норильске](https://ru.wikipedia.org/wiki/Разлив_дизельного_топлива_в_Норильске) (дата обращения: 04.11.2024).
19. Коротченко И. С. Влияние тяжелых металлов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях моркови // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 4 (55). С. 86–91.
20. Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Применение многолетних спутниковых данных для оценки экологической ситуации в районе предприятий нефтегазового комплекса // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29, № 2. С. 177–181.
21. 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.
22. Лобанов Г. В., Зайцева А. Ф., Полякова А. В., Тришкин Б. В., Михеев К. Ю. Пространственно-временная динамика вегетационного индекса EVI (enhanced vegetation index) в разных типах ландшафтов Брянской области // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований за 2011 год. Брянск: НИИ фундам. и приклад. исслед. БГУ, 2012. С. 46–52.

Поступила в редакцию 05.11.2024

Принята к публикации 20.11.2024