

Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш»

©2017. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент, Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,
В. П. Савиных^{1,3}, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,

³Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, ул. Гороховский пер., 4,
e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

В работе приведены результаты изучения динамики вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для идентификации и картографирования наземной растительности по спутниковым данным Landsat на территории государственного природного заповедника «Нургуш». К особенностям предложенного подхода относится оценка значений указанных спектральных индексов отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов. Выбор данных природных объектов основан на их различной чувствительности к воздействию природных и антропогенных факторов среды. Получена и проанализирована сезонная и многолетняя динамика NDVI разных видов растительности на исследуемой территории в период с 1988 по 2016 гг. Установлено, что значения индекса выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь). Выявлены низкие значения NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа 2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки. Это связано с низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков в 1994 г. и относительно засушливым и жарким летом 2010 г. (средняя температура в летний период составила 24,7 °С). Выявлено влияние загрязнения от крупного промышленного комплекса на значения индекса NDVI для сосновых лесов. Установлено, что сосновые леса, расположенные на территории промышленной агломерации центра Кировской области, имеют более низкие значения индекса по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории государственного природного заповедника «Нургуш». Наблюдается тенденция к снижению значений вегетационного индекса на территории вблизи крупных промышленных предприятий.

Ключевые слова: сезонная и многолетняя динамика, вегетационные индексы, Normalized Difference Vegetation Index, Landsat, карты NDVI.

The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve “Nurgush”

T. A. Adamovich¹, G. Ya. Kantor^{1,2}, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}, V. P. Savinykh^{1,3},

¹Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4 Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Results of studying the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) dynamics for identification and mapping land vegetation according to satellite data of Landsat in the territory of the State nature reserve “Nurgush” in Kirov Region of Russia are given. The features of the proposed approach include the estimation of the values of this spectral index separately for pine, deciduous forests and meadow phytocenoses. The choice of these natural objects is based on their different sensitivity to the impact of natural and anthropogenic environmental factors. Seasonal and long-term

dynamics of NDVI for different types of vegetation in the explored territory during the period from 1988 to 2016 is obtained and analysed. It is established that values of the index are higher in summer months (June, August), than in autumn (October). Low NDVI values for vegetal objects on satellite images for July 18, 1994 and on August 7, 2010 are revealed in comparison with values of the index for other years of pictures obtained. This is probably due to the low average monthly air temperature (14.2 °C) and a small amount of rainfall in 1994 and rather droughty and hot summer of 2010 (average temperature during the summer period was 24.7 °C). Influence of pollution from a large industrial complex on values of the NDVI for the pine woods has been investigated. It is established that the pine woods located in the territory of industrial agglomeration of the center of the Kirov region have lower values of the index in comparison with the similar forests located in the territory of the State nature reserve "Nurgush". The tendency to decrease in values of the vegetative index in the close vicinity of large industrial enterprises is observed.

Keywords: seasonal and long-term dynamics, vegetative indexes, Normalized Difference Vegetation Index, Landsat, NDVI maps.

Для исследования и оценки состояния растительности широко применяют так называемые вегетационные индексы [1]. В настоящее время существует около 160 их вариантов. Они подбираются экспериментально, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв [2].

Физиологическое состояние растительности в значительной степени определяется содержанием хлорофилла и уровнем влагообеспеченности [3]. Определение абсолютных значений этих показателей по данным дистанционного зондирования в настоящее время затруднено и требует дополнительных наземных наблюдений. Поэтому целесообразным является использование относительных показателей состояния растительности, получаемых на основе спектральных индексов, тесно коррелирующих с уровнем обеспеченности растений хлорофиллом и влагой.

Одномоментные значения NDVI позволяют чётко отделять и анализировать растительные объекты от прочих природных объектов, тогда как идентификация и классификация разных типов растительности становится затруднительной и не является эффективной [4]. В связи с этим, в качестве основы для идентификации и картографирования растительных объектов решено использовать их различия в динамике NDVI в течение вегетационного периода.

Методы исследований

Расчёт большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62–0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75–1,3 мкм) – максимальное отра-

жение энергии клеточной структурой листа. Поэтому высокий уровень фотосинтетической активности (связанный, как правило, с большой фитомассой растительности) проявляется в низких значениях коэффициента отражения в красной зоне спектра и высоких – в ближней инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет чётко отделять растительность от прочих природных объектов [5–7].

Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещённости снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и других [8].

Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зелёная фитомасса, тем он выше [9]. Ему и было уделено основное внимание в нашем исследовании.

Уравнение для расчёта имеет следующий вид:

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра [10].

К особенностям предложенного в работе подхода относится оценка значений указанных спектральных индексов отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов [11]. Выбор данных природных объектов продиктован их различной чувствительностью к воздействию природных и антропогенных факторов среды [12].

Для анализа сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI использовались многозональные космические снимки за 1988, 1994, 2002, 2005, 2009, 2010, 2015 и 2016 гг.

съёмки в 8-ми спектральных диапазонах с разрешением 30 м, полученные с аппаратов Landsat 5, 7. Снимки были сделаны в летне-осенний период (июнь – октябрь). Также в работе использовались снимки за август 2015 и июнь 2016 гг. в 11-ти спектральных диапазонах с разрешением 30 м, полученные с аппарата Landsat 8. При обработке снимков использовали компьютерную программу ENVI 5.2.

В качестве территории исследования была выбрана территория заповедника «Нургуш», расположенного в Котельничском районе Кировской области. Он создан для охраны пойменных комплексов реки Вятки: многочисленных озёр и хвойно-широколиственных лесов [13]. Исследования, проводимые на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), направлены на инвентаризацию природных комплексов и их компонентов, экологический мониторинг, изучение естественной динамики биоценозов. Хвойные леса представлены ельниками, сосняками, пихтарниками; лиственные леса – липняками, березняками, осинниками, черноольшаниками, дубняками, тополевыми, вязовниками, ивняками. Практически повсеместно леса имеют густой подлесок и обильный подрост из липы. Лесопокрытая территория составляет 87,4% площади заповедника. Болота и заболоченные участки занимают 10% охранной зоны. Большую часть охранной зоны (90%) составляют сосновые леса.

Результаты и обсуждение

Процесс роста и созревания разных видов растений имеет свои особенности, связанные с различным распределением их зелёной массы во времени. Поэтому возможно разделение типов растительности на основе изучения зна-

чений вегетационных индексов в различные периоды вегетации. В связи с этим, в работе проведена оценка значений NDVI отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов.

При анализе сезонной динамики NDVI выявлено, что значения индекса выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь) (табл. 1).

Это может быть объяснено сезонной динамикой вегетационного индекса, так как растения в течение сезона проходят все фазы вегетации. Сроки прохождения фаз меняются в зависимости от метеоусловий данного года. По мере смены фаз вегетативного развития меняются состав и содержание пигментов в листьях растений, увеличивается биомасса, количество хлорофилла в зелёных листьях растений. По мере накопления хлорофилла понижается яркость растений в видимой части спектра, особенно в красной зоне и возрастает в инфракрасной [14]. Следовательно, значение NDVI возрастает (см. рис. 1 на цветной вкладке).

С разрушением хлорофилла в осенние месяцы наблюдается обратная картина – яркость в красной зоне возрастает, а в ближней инфракрасной уменьшается, что прослеживается при анализе снимка за 26 октября 2016 г. (рис. 2 на цветной вкладке).

Значения NDVI в октябре для лиственных смешанных лесов значительно ниже, чем в летние месяцы, а для прибрежной растительности – практически равны 0 (0–0,15). Уменьшение значений индекса связаны с усыханием растительности и, следовательно, низким содержанием хлорофилла в ней. Участки с отсутствием вегетации представлены у рек и озёр – отрицательные значения NDVI (-0,25–0).

Сравнение значений NDVI с учётом сезонной динамики развития растений выявляет

Таблица 1 / Table 1
Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш в 2016 г.
NDVI values of natural objects in the territory of Nurgush Reserve in 2016

Класс объектов Class of objects	Значения индекса NDVI NDVI values		
	20.06	07.09	26.10
Водные объекты / Water objects	-0,25–0	-0,25–0	-0,35–0
Пляж, почва / Beach, soil	0–0,25	0–0,25	0–0,15
Хвойные леса / Coniferous forests	0,25–0,42	0,25–0,43	0,23–0,41
Смешанные леса / Mixed forests	0,42–0,48	0,43–0,50	0,15–0,21
Дубравы / Oak groves	0,48–0,57	0,5–0,57	0,08–0,15
Прибрежная растительность / Coastal vegetation	0,57–0,68	0,57–0,67	0–0,15

Таблица 2 / Table 2

Значения NDVI природных объектов на территории заповедника «Нургуш» в период с 1998 по 2016 гг. по данным Landsat 5, 7
 NDVI values for natural objects in the territory of Nurgush Reserve in the range 1998–2016 according to data of Landsat 5, 7

Класс объектов Class of objects	Значения индекса NDVI / NDVI values					
	1988 09.07	1994 18.07	2005 09.08	2010 07.08	2015 21.08	2016 07.08
Водные объекты / Water objects	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0,05	-0,25–0
Пляж, почва / Beach, soil	0–0,25	0–0,25	0–0,27	0–0,25	0,05–0,25	0–0,25
Хвойные леса / Coniferous forests	0,25–0,42	0,25–0,40	0,27–0,42	0,25–0,44	0,25–0,46	0,25–0,42
Смешанные леса / Mixed forests	0,42–0,5	0,40–0,43	0,42–0,48	0,44–0,48	0,46–0,48	0,42–0,5
Дубравы / Oak groves	0,5–0,59	0,43–0,52	0,48–0,54	0,48–0,53	0,48–0,53	0,5–0,56
Прибрежная растительность / Coastal vegetation	0,59–0,78	0,52–0,61	0,54–0,7	0,53–0,62	0,53–0,65	0,57–0,73

снижение индексов в октябре в сравнении с показателями в июне и августе, что можно объяснить снижением общего количества хлорофилла в конце вегетационного периода. Данный факт говорит о достоверности применяемых методов при анализе состояния растительности.

Кроме того, в работе приведена многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI для всех классов выделенных объектов при анализе снимков за июль 1988 и 1994 гг.; а также август 2005, 2010, 2015 и 2016 гг. (табл. 2).

При анализе многолетней динамики NDVI установлено, что одинаковые значения индекса за период 28 лет характерны для водных объектов (-0,25–0), а также пляжей и почв (0–0,25). Для хвойных лесов значения NDVI также отличаются незначительно и находятся в интервале от 0,25 до 0,46.

При расчёте NDVI по снимкам за август 2005 и август 2015 гг. получены сопоставимые результаты: значения индекса колеблются в одном интервале для каждого класса изучаемых объектов. Анализ погодных условий за август в данные годы показал, что температура воздуха и количество выпавших осадков примерно одинаковы. Такая же тенденция наблюдается при анализе значений NDVI по космоснимкам за июль 1988 г. (рис. 3 на цветной вкладке) и август 2016 г.

Выявлены значительные различия в значениях NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа

2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки (рис. 4 на цветной вкладке). Низкие значения вегетационного индекса в июле 1994 г. для смешанных лесов и прибрежной растительности могут быть связаны с достаточно низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков. Достаточно низкие температуры для периода вегетации растений нарушают течение биохимических процессов в клетках, и тем самым могут вызывать в них необратимые изменения, приводящие к прекращению роста растений и даже их гибели [15]. Кроме того, температура оказывает большое влияние на жизнедеятельность почвенной микрофлоры, обуславливающей минеральное питание растений. Достаточно низкие значения NDVI в августе 2010 г., по сравнению с августом 2016 г. связаны с относительно засушливым и жарким летом 2010 г. Средняя температура в летний период 2010 года составила 24,7 °С. В жаркие засушливые периоды NDVI существенно снижается, что сопровождается уменьшением продуктивности фитоценозов и поглощённого растительностью излучения в красной области спектра [16]. Кроме того, на низкие значения вегетационного индекса в августе 2010 г. повлиял дефицит почвенной влаги.

Таким образом, общие особенности сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI сохраняются на протяжении 28 лет, но среднемесячные значения существенно различаются в зависимости от соот-

Таблица 3 / Table 3

Значения NDVI для хвойных лесов на территории заповедника «Нургуш» и вблизи городов Киров и Кирово-Чепецк / NDVI values for coniferous forests in the territory of Nurgush Reserve and near cities of Kirov and Kirovo-Chepetsk

Спутник / Satellite	Дата съёмки / Shooting date	«Нургуш» / Nurgush	Территория вблизи г. Киров и г. Кирово-Чепецк / Territory near cities of Kirov and Kirovo-Chepetsk
Landsat 4	09.07.1988	0,25–0,42	0,25–0,42
Landsat 7	01.08.2002	0,27–0,45	0,25–0,41
Landsat 5	12.08.2009	0,25–0,45	0,25–0,41
Landsat 7	21.08.2015	0,27–0,46	0,25–0,39

ношения агроклиматических факторов – температуры, осадков, относительной влажности.

Кроме того, в работе проведено сравнение значений NDVI для сосновых лесов, расположенных на территории заповедника «Нургуш», и сосновых лесов в центре Кировской области вблизи крупных городов Киров и Кирово-Чепецк. Город Киров является областным центром Кировской области. Промышленный комплекс города представлен предприятиями машиностроения, металлообработки, химической промышленности, лесопромышленного комплекса, теплоэнергетики. Киров является крупным автомобильным и железнодорожным узлом. Через город проходят железнодорожные пути, идущие на Нижний Новгород, Москву, Вологду, Санкт-Петербург, Пермь. На территории города Кирово-Чепецка функционирует более 60 лет Кирово-Чепецкий промышленный комплекс (КЧПК), в состав которого входят крупные предприятия по производству фторполимеров и минеральных удобрений.

Наиболее характерными направлениями негативного воздействия крупных промышленных предприятий на природные комплексы являются загрязнение воздушного бассейна выбросами промышленных котельных, загрязнение подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-бытовыми сточными водами предприятий, городов и посёлков, изъятие из землепользования и нарушение десятков тысяч гектаров земель при загрязнении их отходами производств. Кроме того, мощным источником загрязнения воздушной среды городов является автомобильный транспорт.

Загрязнение атмосферного воздуха негативно влияет на жизненное состояние древостоев, что выражается в разреженности крон, усыхании верхушек и ветвей, ослаблении

подроста. По литературным данным [17–19], сосна обыкновенная является одним из наиболее чувствительных индикаторов загрязнения воздушной среды. В связи с этим в работе сравнивается состояние сосновых лесов на заповедной территории и в центре Кировской области, где наиболее выражено техногенное воздействие на атмосферу. Результаты расчёта значений вегетационного индекса NDVI представлены в таблице 3.

Установлено, что сосновые леса, расположенные на территории Киро-Кирово-Чепецкой промышленной агломерации, имеют более низкие значения индекса по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории государственного природного заповедника «Нургуш» (рис. 5, 6 на цветной вкладке).

Так, значения вегетационного индекса по космическому снимку за 1 августа 2002 г. для хвойных лесов территории заповедника колеблются в интервале 0,27–0,45, на территории вблизи городов Киров и Кирово-Чепецк – в интервале 0,25–0,41. Хотя в июле 1988 г. значения NDVI для хвойных лесов на исследуемых территориях были примерно одинаковыми (0,25–0,42). Тенденция к снижению значений вегетационного индекса на территории вблизи крупных промышленных предприятий наблюдается при анализе снимков за август 2009 (0,25–0,41) и 2015 гг. (0,25–0,39).

Заключение

Результаты проведённых расчётов показывают, что использование вегетационного индекса NDVI позволяет проводить идентификацию и классификацию разных типов растительности по спутниковым изображениям, а также проследить сезонные изменения

Литература

в растительных сообществах. Установлено, что значения индекса лиственных фитоценозов выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь), что вполне объяснимо снижением общего количества хлорофиллов в конце вегетационного периода.

Проанализирована многолетняя динамика значений вегетационного индекса NDVI для растительных сообществ территории заповедника «Нургуш» в период 1988–2016 гг. При расчёте NDVI по снимкам за август 2005 и август 2015 гг. значения индекса колеблются в одном интервале для каждого класса изучаемых объектов, так как климатические условия (температура воздуха, количество выпавших осадков) в данные годы съёмки были примерно одинаковыми. Выявлены низкие значения NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа 2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки. Это связано с низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков в 1994 г. и относительно засушливым и жарким летом 2010 г. (средняя температура в летний период составила 24,7 °С).

Установлено, что сосновые леса, расположенные вблизи промышленных центров, имеют более низкие средние значения индекса NDVI (0,33) по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории заповедника «Нургуш» (0,36).

Результаты проведённых исследований показывают, что использование вегетационного индекса NDVI позволяет проводить идентификацию и классификацию разных типов растительности по спутниковым изображениям, а также проследить сезонные изменения в растительных сообществах. Общие особенности многолетней динамики вегетационного индекса NDVI сохраняются в течение ряда лет, но средние месячные значения существенно различаются в зависимости от соотношения агроклиматических факторов – температуры, осадков, относительной влажности.

Использование космических снимков даёт возможность значительно сократить выполнение наземных экспериментальных работ и оперативно проводить крупномасштабное картографирование особо охраняемых и природно-техногенных территорий.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2120.2017.5).

1. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
2. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
3. Леса Кировской области / Под ред. А.И. Видякина, Т.Я. Ашихминой, С.Д. Новосёлова. Киров: Кировская областная типография, 2008. 400 с.
4. Лиджиева Н.Ц., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Чёрные земли // Известия Саратовского университета. 2012. Т. 12. Сер. Химия. Биология. Экология. Вып. 2. С. 94–96.
5. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology, Brisbane, Australia. 1996. P. 57–61.
6. Cridland S., Burnside D., Smith R. The NDVI – use in rangeland management // In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress. Salt Lake City, Utah, 1995. P. 105–106.
7. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions // Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc. 1987. P. 103–107.
8. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
9. Rippen R.E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment, 1990. V. 34. P. 71–73.
10. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. V. 33. P. 481–486.
11. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 561–577.
12. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 9–18.
13. Тарасова Е.М., Кондрухова С.В., Целищева Л.Г. Государственный природный заповедник «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 90–97.
14. Epstein H.E., Walker D.A., Reynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships

along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. GC31A-0697.

15. Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for early prediction of wheat grain yields in Morocco // International Journal of Applied Earth Observation. 2008. No. 10. P. 438–452.

16. Лобанов Г.В., Зверева А.Ю., Коханько М.В., Хорина Е.В., Тришкин Б.В., Полякова А.В., Ужаккина А.П. Сезонная динамика спектральных характеристик пахотных угодий Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 112–117.

17. Шепяте Я., Вяцкус А. Методика оценки состояния хвойных лесов в процессе лесоустройства при локальном загрязнении среды // Лесное хозяйство. 1986. № 10. С. 47–49.

18. Токарева О.С., Касьянов И.В. Оценка динамики состояния растений биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 268–272.

19. Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М. Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 30–42.

References

1. Cherepanov A.S. Vegetation indices: reference materials // Geomatika. 2011. No. 2. P. 98–102 (in Russian).

2. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetative indices // Geomatika. 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).

3. Forests of the Kirov region / Eds. A.I. Vidyakin, T.Ya. Ashikhmina, S.D. Novoselov. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2008. 400 p. (in Russian).

4. Lidzhiyeva N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L. Experience of using the vegetation index (NDVI) for determining the biological productivity of phytocenoses of the arid zone on the example of the Black Earth region // Izvestiya Saratovskogo universiteta. 2012. T. 12. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. V. 2. P. 94–96 (in Russian).

5. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology, Brisbane, Australia. 1996. P. 57–61.

6. Cridland S., Burnside D., Smith R. The NDVI – use in rangeland management // In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress. Salt Lake City, Utah, 1995. P. 105–106.

7. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions // Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc. 1987. P. 103–107.

8. Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. Moskva: Tekhnosfera, 2010. 560 p. (in Russian).

9. Crippen R.E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment, 1990. V. 34. P. 71–73.

10. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. V. 33. P. 481–486.

11. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 561–577.

12. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2017. No. 2. P. 9–18 (in Russian)

13. Tarasova E.M., Kondrukhova S.V., Tselishcheva L.G. The State natural reserve “Nurgush” // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2009. No. 2. P. 90–97 (in Russian).

14. Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. GC31A-0697.

15. Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for early prediction of wheat grain yields in Morocco // International Journal of Applied Earth Observation. 2008. No. 10. P. 438–452.

16. Lobanov G.V., Zvereva A.Yu., Kokhanko M.V., Khorina E.V., Trishkin B.V., Polyakova A.V., Uzhakina A.P. Seasonal dynamics of the spectral characteristics of arable land in the Bryansk Region // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014. No. 4. P. 112–117 (in Russian).

17. Shepyatene Ya., Vyantskus A. Method for assessing the condition of coniferous forests during forest management in the presence of local contamination of the environment // Lesnoye khozyaystvo. 1986. No. 10. P. 47–49 (in Russian).

18. Tokareva O.S., Kasyanov I.V. Assessment of state dynamics of plants – bioindicators of atmospheric pollution based on remote sensing data // Vestnik nauki Sibiri. 2011. No. 1 (1). P. 268–272 (in Russian).

19. Vasilevich M.I., Elsakov V.V., Shchanov V.M. Application of satellite research methods in monitoring the state of forest phytocenoses in the zone of emissions of an industrial enterprise // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. No. 1. P. 30–42 (in Russian).