

39. Backman, G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's.) / G. Backman // Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen. – 1938. – Vol. 138. – P. 37–58.

40. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents / H. Poorter, A. M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado, S. Kuyah, Y. Luo, J. Oleksyn, V. A. Usoltsev, T. N. Buckley, P. B. Reich, L. Sack // New Phytologist. – 2015. – Vol. 208. – Issue 3. – P. 736–749. DOI: 10.1111/nph.13571/epdf.

---

УДК 630\*233

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА НАРУШЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

А.С. ОПЛЕТАЕВ – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент\*,  
тел.: 89090005389, e-mail: opletaev.ekb@yandex.ru

Е.В. ЖИГУЛИН – аспирант\*,  
e-mail: eugeny13@mail.ru

В. А. КОСОВ – магистр\*,  
e-mail: kosovmi@mail.ru

\* ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,  
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт 37, кафедра лесоводства

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, NDVI, нарушенные земли, лесная рекультивация, насаждение лесное, естественное лесовозобновление, искусственное лесовосстановление.

Проведено исследование данных спутниковых снимков высокого пространственного разрешения для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях Свердловской области. Установлено, что применение вегетационного индекса NDVI позволяет успешно идентифицировать древесную растительность, произрастающую на отвалах вскрышных пород. Набор снимков в течение всего анализируемого года позволяет вычислить параметры активности вегетации древесной растительности на нарушенных землях. Объектом исследований являлась древесная растительность естественного происхождения, произрастающая на отвалах вскрышных пород ОАО «Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат». Отвалы формировались в период с 1991 по 1999 гг. На отвале «Восточный» заложены ПП № 1 (25,2 га) на верхней площадке и ПП № 2 (3,9 га) на склоне отвала. На отвале «Северо-Пролетарский» заложены ПП № 3 (4,9 га) на верхней площадке и ПП № 4 (7,8 га) на склоне отвала. Отсутствие травянистой растительности на изучаемых отвалах позволяет точно идентифицировать древесную растительность с помощью вегетационного индекса NDVI. В результате исследований установлено, что степень зарастания древесной растительностью составила от 61,6 до 69,4 % в зависимости от местоположения участка. Среднегодовая интенсивность вегетации лесных насаждений естественного происхождения на отвале «Восточный» характеризуется как средняя на всех высотных уровнях (ПП № 1 NDVI = 0,43; ПП № 2 NDVI = 0,33) а на отвале «Северо-Пролетарский» вегетация оценивается как высокая на склоне (ПП № 3 NDVI = 0,63) и хорошая на верхней площадке (ПП № 4 NDVI = 0,51). С помощью геоинформационных систем составлены карты и отражены зоны вегетации. Доля площади с низкой степенью вегетации (NDVI 0,2–0,3) наибольшая на склоне отвала (ПП № 2 – 38,4 %, ПП № 4 – 37,1 %). Данные о зонах с низкой степенью вегетации позволяют выявить локальные участки, лишенные растительности, для назначения мероприятий по рекультивации и планирования создания насаждений искусственным способом.

## USING THE NDVI VEGETATION INDEX TO ASSESS THE STATE OF FOREST PLANTATIONS ON DISTURBED LAND

A. OPLETAEV – candidate of agricultural Sciences, assistant professor\*  
Tel.: 89090005389, e-mail: opletaev.ekb@yandex.ru

E. ZHIGULIN – postgraduate student\*  
e-mail: eugeny13@mail.ru

V. KOSOV – Magister\*  
e-mail: kosovmi@mail.ru

FSBEE HE «Ural State Forest Engineering University»,  
620100, Russia, Yekaterinburg, Siberian tract 37, department of forestry

**Keywords:** *geographic information systems, NDVI, disturbed lands, forest reclamation, forest planting, natural reforestation, artificial reforestation.*

The data of satellite images of high spatial resolution was studied. The assessment of the state of forest plantations on disturbed lands in the Sverdlovsk region was studied. It was found that the use of the NDVI vegetation index allows us to successfully identify woody vegetation growing on the dumps of mountain quarries. A set of satellite images allows you to calculate the parameters of vegetation activity of woody vegetation on disturbed lands. The object of research was wood vegetation of natural origin growing on the dumps of the Ural asbestos mining and processing plant. The dumps were formed between 1991 and 1999. On the «Vostochnyj» dump, there are laid out inventory plot № 1 (25,2 ha) on the upper platform and inventory plot № 2 (3,9 ha) on the slope of the dump. On the «Severo-Proletarskyj» dump, there are laid out inventory plot № 3 (4,9 ha) on the upper platform and inventory plot № 4 (7,8 ha) on the slope of the dump. The absence of grassy vegetation on the studied dumps allows for accurate identification of woody vegetation using the NDVI vegetation index. As a result of research, it was found that the degree of overgrowth of woody vegetation ranged from 61,6 to 69,4 %, depending on the location of the site. The average annual vegetation intensity of forest stands of natural origin on the overburden dumps on the «Vostochnyj» dump is characterized as average at all high-altitude levels (inventory plot № 1 NDVI = 0,43; inventory plot № 2 NDVI = 0,33) and on the «Severo-Proletarskyj» dump vegetation is estimated as high on the slope (inventory plot № 3 NDVI = 0,63) and good on the upper platform (inventory plot № 4 NDVI = 0,51). With the help of geographic information systems maps have been drawn and reflected areas of vegetation. The share of the area with a low degree of vegetation (NDVI 0,2–0,3) is highest on the slope of the dump (inventory plot № 2–38,4 %, inventory plot № 4–37,1 %). Data on areas with a low degree of vegetation allows you to identify local areas that are devoid of vegetation for the purpose of reclamation activities and planning the creation of artificial plantings.

### Введение

Изучение процессов восстановления растительности на нарушенных горными выработками землях является актуальным вопросом для Уральского региона [1–3]. По данным Росреестра, на территории Свердловской области площадь нарушенных земель, представленных

карьерными выемками, отвалами, хранилищами горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, торфоразработками, гарями, вырубками, а также нарушенных в результате сельскохозяйственного производства, мелиоративных работ и прокладки коммуникаций составляет 548,95 тыс. га [4].

Для оценки состояния растительности наиболее перспективным направлением исследований является анализирование спутниковых снимков высокого пространственного разрешения с оценкой интенсивности вегетации [5–7]. Дистанционный мониторинг процессов рекультивации нарушенных земель позволяет

своевременно оценить успешность естественного зарастания или назначить мероприятия по искусственному восстановлению растительности.

#### Цель, задачи, методика и объекты исследования

Исследования выполнялись с целью возможности применить данные спутниковых снимков высокого пространственного разрешения для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях. В задачи исследований входит применение вегетационного индекса NDVI при оценке активности вегетации древесной растительности на нарушенных землях.

Для оценки состояния лесной растительности на нарушенных землях использованы космические снимки высокого разрешения за весь вегетационный период 2019 г. Аэрофотоснимки высокого разрешения или данные спутникового мониторинга позволяют вычислить вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – относительный показате-

ль количества фотосинтетической активной биомассы). Расчет вегетационного индекса NDVI и идентификация растительности выполнялись с помощью геоинформационной системы QGIS. Вегетационные индексы успешно применяются для оценки растительности в различных отраслях [8–10]. Шкала оценки развития растительного покрова на отвалах представлена в табл. 1 [11, 12].

Величина NDVI зависит от общей биомассы растительности. Наличие растений на анализируемой площади определяется значениями NDVI от значения 0,1. Для лесных насаждений в данных лесорастительных условиях значения индекса находятся в диапазоне 0,80–0,83.

Объектом исследований являлась древесная растительность естественного происхождения, произрастающая на отвалах вскрышных пород ОАО «Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат». Отвалы формировались в период с 1991 по 1999 гг. На отвале «Восточный» заложены ПП № 1 (25,2 га)

на верхней площадке и ПП № 2 (3,9 га) на склоне отвала. На отвале «Северо-Пролетарский» заложены ПП № 3 (4,9 га) на верхней площадке и ПП № 4 (7,8 га) на склоне отвала. Район исследований относится к таежной лесорастительной зоне, Средне-Уральскому таежному району.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате натурного обследования отвалов установлено, что естественное зарастание отвалов происходит преимущественно сосной обыкновенной с незначительной примесью березы повислой и лиственницы Сукачева. Последнее соответствует результатам исследований других авторов [13–15]. Максимальный возраст деревьев, произрастающих на отвале «Восточный», варьирует от 18 до 25 лет, а на отвале «Северо-Пролетарский» – от 19 до 27 лет.

Для более детального анализа интенсивности вегетации растительного покрова на отвалах вскрышных пород составлены тематические карты распределения индекса NDVI (рис. 1–3), рассчитанного по данным спутниковых снимков высокого пространственного разрешения в период с апреля по октябрь 2019 г. По результатам обработки полученных материалов в ГИС-приложении QGIS были получены данные об интенсивности вегетации (табл. 2) и рассчитаны основные статистические показатели индексов NDVI для древесной растительности исследованных отвалов (табл. 3).

Таблица 1  
Table 1

Зависимость индекса NDVI от состояния растительного покрова  
Dependence of the NDVI index on the state of vegetation cover

Значение индекса NDVI The index value of NDVI	Степень развития зеленой биомассы The degree of development of green biomass
0–0.2	Отсутствие растительности Lack of vegetation
0.2–0.3	Низкая степень развития биомассы The low degree of development of biomass
0.3–0.6	Средняя степень развития биомассы The average degree of development of biomass
0.6–1.0	Высокая степень развития биомассы A high degree of development of biomass



Рис. 1. Спутниковый снимок зарастающего отвала вскрышных пород  
 Fig. 1. Satellite image of inventory plot № 4

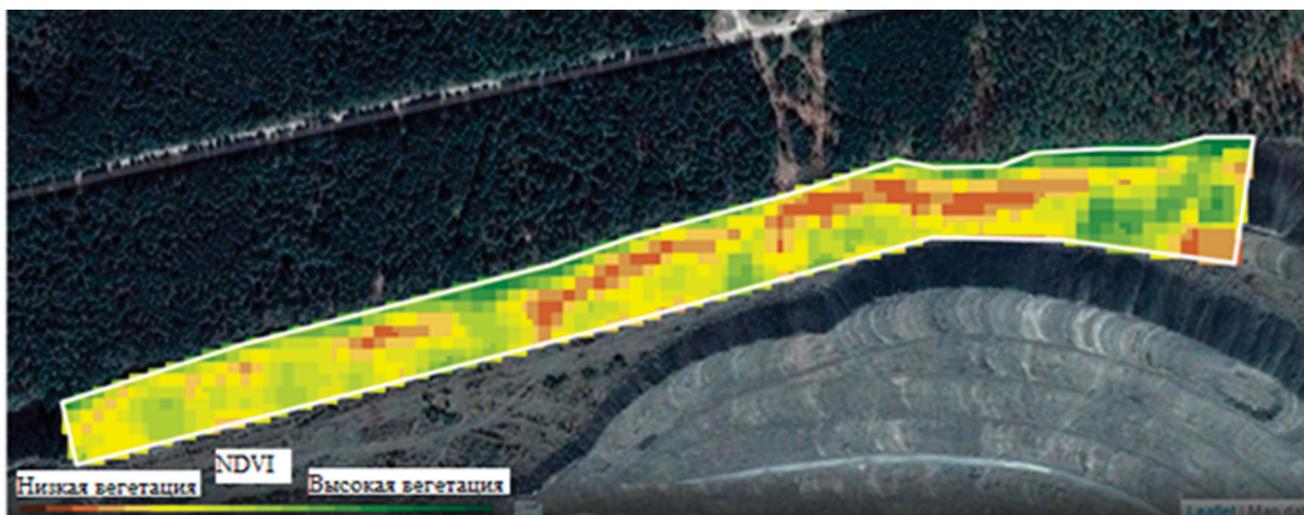


Рис. 2. Расчет вегетационного индекса NDVI  
 Fig. 2. Calculation of the NDVI vegetation index



Рис. 3. Зоны вегетации на основе усредненных данных индекса NDVI за 2019 г.  
 Fig. 3. Vegetation zones based on the average data of the NDVI index for 2019

Таблица 2

Table 2

Анализ вегетации насаждений на отвалах вскрышных пород  
Analysis of vegetation on overburden dumps

Пробная площадь	Начало вегетации в 2019 г.	Окончание вегетации в 2019 г.	Продолжительность вегетации, дней	NDVI, среднее за период вегетации	Интенсивность вегетации
1	10,05	07,10	151	0,43	Средняя
2	15,04	07,10	174	0,33	Средняя
3	15,04	07,10	174	0,63	Высокая
4	08,05	10,09	126	0,51	Хорошая

Таблица 3

Table 3

Статистические показатели индексов NDVI на пробных площадях  
Statistical indicators of NDVI indexes on inventory plots

Статистические показатели Statistical indicator	ПП № 1 IP № 1	ПП № 2 IP № 2	ПП № 3 IP № 3	ПП № 4 IP № 4
Стандартная ошибка Standard error	0,03	0,03	0,06	0,05
Медиана Median	0,45	0,30	0,70	0,60
Мода Mode	0,55	0,20	0,80	0,65
Стандартное отклонение Standard deviation	0,13	0,16	0,22	0,18
Дисперсия выборки Dispersion	0,02	0,02	0,05	0,04
Экцесс Kurtosis	0,15	-1,37	-0,30	0,12
Асимметричность Skewness	-1,05	0,24	-1,09	-1,12
Интервал Interval	0,40	0,45	0,60	0,50
Минимум Minimum	0,15	0,10	0,20	0,15
Максимум Maximum	0,55	0,55	0,80	0,65
Уровень надежности (95,0 %) Level of measurement	0,07	0,07	0,12	0,11

Спутниковые снимки за весь период вегетации позволяют получить данные о сроках начала и окончания вегетации. Установлено, что на различных отвалах и высотных уровнях сроки начала и окончания вегетации могут отличаться. Усредненные данные

об интенсивности вегетации на основе индексов NDVI позволяют оценить интенсивность вегетации анализируемых насаждений. Интенсивность вегетации лесных насаждений естественного происхождения на отвалах вскрышных пород ОАО «Урал-

асбест» на отвале «Восточный» характеризуется как средняя на всех высотных уровнях, а на отвале «Северо-Пролетарский» вегетация оценивается как высокая на склоне и хорошая на верхней площадке.

По данным статистической обработки данных для лесных насаждений, сформированных естественным путем на отвалах вскрышных пород, установлено, что значения индекса NDVI имеют большой интервал (от 0,4 до 0,6) в течение вегетационного периода. Полученные величины интервалов оказались существенно выше фоновых. В нормальных условиях индекс NDVI имеет минимальные значения в весенний период, стабильные показатели в летний период и плавное снижение интенсивности вегетации осенью. Деревья в средней и верхней частях склона отвалов вскрышных пород характеризуются замедленным ростом, который объясняется неблагоприятными почвенно-грунтовыми условиями и резкими

колебаниями индекса вегетации. Недостаток влаги и элементов питания в течение года может вызвать резкое снижение интенсивности вегетации или ее подъем при наличии осадков.

В целом состояние растительности на отвалах характеризуется как удовлетворительное и соответствует средней степени развития биомассы.

Данные табл. 4 позволяют оценить степень зарастания исследованных участков нарушенных земель.

Установлено, что зарастание древесной растительности на отвалах вскрышных пород ОАО «Ураласбест» происходит удовлетворительно и степень зарастания древесной растительностью составляет от 61,6 до 69,4 % в зависимости от местоположения

участка. Большой разницы степени зарастания от высотных уровней отвала не зафиксировано. Соотношение открытых участков и занятых древесной растительностью, представленной сосной обыкновенной, березой повислой и лиственницей Сукачева, на всех пробных площадях примерно одинаково. Можно отметить лишь различие в площади зон с низкой степенью вегетации в зависимости от местоположения растительности. Доля площади с низкой степенью вегетации (NDVI 0,2–0,3) наибольшая на склоне отвала (ПП № 2 – 38,4 %, ПП № 4 – 37,1 %). Почвенно-грунтовые условия на верхней площадке отвала по сравнению с таковыми на склоне более благоприятны для роста древесной растительности.

Таблица 4  
Table 4

Оценка зарастания отвалов вскрышных пород древесной растительностью  
Assessment of overgrowth of overburden dumps with woody vegetation

№ ПП	Местоположение	Площадь, га	Зоны вегетации, га/%			Степень зарастания, %
			Высокая	Средняя	Низкая	
1	Верхняя площадка	25,2	$\frac{8,1}{32,1}$	$\frac{7,5}{29,8}$	$\frac{9,6}{38,1}$	61,9
2	Склон отвала	3,9	$\frac{1,2}{30,8}$	$\frac{1,2}{30,8}$	$\frac{1,5}{38,4}$	61,6
3	Верхняя площадка	4,9	$\frac{1,7}{34,7}$	$\frac{1,7}{34,7}$	$\frac{1,5}{30,6}$	69,4
4	Склон отвала	7,8	$\frac{2,4}{30,8}$	$\frac{2,5}{32,1}$	$\frac{2,9}{37,1}$	62,9

### Выводы

1. Отсутствие живого напочвенного покрова на нарушенных землях позволяет точно идентифицировать древесную растительность с помощью вегетационного индекса NDVI и оце-

нить степень зарастания отвалов вскрышных пород. Степень зарастания древесной растительностью составила от 61,6 до 69,4 % в зависимости от местоположения участка.

2. Спутниковые снимки за весь период вегетации позволяют получить усредненные данные об интенсивности вегетации на основе индексов NDVI. Интенсивность вегетации лесных насаждений естественного

происхождения на отвалах вскрышных пород ОАО «Урал-асбест» на отвале «Восточный» характеризуется как средняя на всех высотных уровнях (ПП № 1 NDVI = 0,43; ПП № 2 NDVI = 0,33), а на отвале «Северо-Пролетарский» вегетация оценивается как высокая на

склоне (ПП № 3 NDVI = 0,63) и хорошая на верхней площадке (ПП № 4 NDVI = 0,51).

3. Картирование и отражение зон вегетации позволяет выявить локальные участки, лишённые растительности, или зоны с низкой степенью вегетации для назначения мероприятий

по рекультивации нарушенных участков и планирования создания насаждений искусственным способом. Доля площади с низкой степенью вегетации (NDVI 0,2–0,3) наибольшая на склоне отвала (ПП № 2 – 38,4 %, ПП № 4 – 37,1 %).

### Библиографический список

1. Рекультивация нарушенных земель на месторождении тантал-бериллия / С. В. Залесов, Е. С. Залесова, Ю. В. Зарипов, А. С. Оплетаев, О. В. Толкач // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 63–67.
2. Динамика естественного лесовосстановления на нарушенных в процессе нефтегазодобычи землях на территории Нефтеюганского района ХМАО – Югры / С. В. Залесов, А. Е. Морозов, Р. В. Морозова, Е. П. Платонов // Леса России и хозяйство в них. – 2011. – № 3 (40). – С. 6–20.
3. Пути рекультивации нарушенных в процессе нефтегазоразведки земель / А. Е. Морозов, С. В. Залесов, А. В. Капралов, М. В. Винокуров, В. И. Лобанов, В. Г. Решетников // Леса России и хозяйство в них. – 2008. – № 1 (30). – С. 49–55.
4. Информационно-аналитическая записка о состоянии земель Свердловской области в 2017 году. – Екатеринбург : Управление Росреестра по Свердловской области, 2018. – 102 с.
5. Многолетние тренды в состоянии растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгурского Алатау по данным EMODIS NDVI C6 (2002–2019) / А. Г. Терехов, И. С. Витковская, И. И. Абаев, С. А. Долгих // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 6. – С. 133–142.
6. Методика дешифрирования аэрофотоснимков в целях экологического мониторинга и аудита нефтегазовых месторождений / С. В. Залесов, Л. И. Аткина, И. Ф. Коростелев, Н. Я. Кручинин, К. И. Лопатин, И. А. Юсупов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 80 с.
7. Фомин, В. В. Методики оценки густоты подроста и древостоев при зарастании сельскохозяйственных земель древесной растительностью с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / В. В. Фомин, С. В. Залесов, А. Г. Магасумова // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 1 (131). – С. 25–29.
8. Mapping and estimating the total living biomass and carbon in low-biomass woodlands using Landsat 8 CDR data / B. Gizachew, S. Solberg, E. Næsset [et al] // Carbon Balance Manage. – 11, 13 (2016). – URL: <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0055-8>
9. Clevers, J. G. P. W. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3 / J. G. P. W. Clevers, A. A. Gitelson. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2013. – 23 (1). P. 344–351. DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
10. A Simple Method for Retrieving Understory NDVI in Sparse Needleleaf Forests in Alaska Using MODIS BRDF Data / W. Yang, H. Kobayashi, R. Suzuki, K. N. Nasahara // Remote Sensing. – 2014. – 6 (12). – 11936–11955.
11. Чашин, А. Н. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна / А. Н. Чашин, М. А. Кондратьева // Географический вестник. – 2019. – № 2 (49). – С. 135–147.

12. Deforestation and Loss of Biodiversity Surrounds the Ethiopian Church Forests // Tree foundation. – 2013. – URL: <http://treefoundation.org/projects/churchforests-of-ethiopia/regional-view-of-deforestation/> (дата обращения: 27.01.2020).
13. Накопление подроста на отвалах месторождения хризотил-асбеста / Ю. В. Зарипов, Е. С. Залесова, С. В. Залесов, Е. П. Платонов // Успехи современного естествознания, – 2019. – № 7. – С. 21–25.
14. Залесов, С. В. Естественная рекультивация отвалов вскрышных пород и отходов обогащения асбестовых руд / С. В. Залесов, Ю. В. Зарипов, Е. С. Залесова // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 3 (157). – С. 35–38.
15. Залесов, С. В. Анализ состояния подроста березы повислой (*Betula pendula* Both.) на отвалах месторождений хризотил-асбеста по показателю флуктуирующей асимметрии / С. В. Залесов, Ю. В. Зарипов, Е. А. Фролова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В. Р. Филиппова. – 2017. – № 1 (46). – С. 71–77.

### *Bibliography*

1. Reclamation of disturbed lands at the tantalum-beryllium deposit / S. V. Zalesov, E. S. Zalesova, Yu. V. Zaripov, A. S. Opletaev, O. V. Tolkach // Ecology and industry of Russia. – 2018. – Vol. 22. – No. 12. – P. 63–67.
2. Dynamics of natural reforestation on lands disturbed in the process of oil and gas production on the territory of the Nefteyugansk district of KХMAO – Yugra / S. V. Zalesov, A. E. Morozov, R. V. Morozova, E. P. Platonov // Forests of Russia and agriculture in them. – 2011. – No. 3 (40). – P. 6–20.
3. Ways of recultivation of lands disturbed in the process of oil and gas exploration / A. E. Morozov, S. V. Zalesov, A. V. Kapralov, M. V. Vinokurov, V. I. Lobanov, V. G. Reshetnikov // Forests of Russia and agriculture in them. – 2008. – No. 1 (30). – P. 49–55.
4. Information and analytical note on the state of the Sverdlovsk region's lands in 2017. – Yekaterinburg : Department of the Federal registration service for the Sverdlovsk region, 2018. – 102 p.
5. Long-term trends in the vegetation state of the Tien Shan and Jungur Alatau ridges according to EMODIS NDVI C6 (2002–2019) / A. G. Terekhov, I. S. Vitkovskaya, I. I. Abaev, S. A. Dolgikh // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. – 2019. – Vol. 16. – No. 6. – P. 133–142.
6. Methods of decoding aerial photographs for environmental monitoring and audit of oil and gas fields / S. V. Zalesov, L. I. Atkina, I. F. Korostelev, N. Ya. Kruchinin, K. I. Lopatin, I. A. Yusupov. – Yekaterinburg : Ural branch Russian science academy, 2003. – 80 p.
7. Fomin, V. V. Methods for assessing the density of undergrowth and stands when overgrowing agricultural land with woody vegetation using high-resolution satellite images / V. V. Fomin, S. V. Zalesov, A. G. Magasumova // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2015. – No. 1 (131). – P. 25–29.
8. Mapping and estimating the total living biomass and carbon in low-biomass woodlands using Landsat 8 CDR data / B. Gizachew, S. Solberg, E. Næsset [et al] // Carbon Balance Manage. – 11, 13 (2016). – URL: <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0055-8>
9. Clevers, J. G. P. W. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3 / J. G. P. W. Clevers, A. A. Gitelson. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2013. – 23 (1). P. 344–351. – DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
10. A Simple Method for Retrieving Understory NDVI in Sparse Needleleaf Forests in Alaska Using MODIS BRDF Data / W. Yang, H. Kobayashi, R. Suzuki, K. N. Nasahara // Remote Sensing. – 2014. – 6 (12). – 11936–11955.
11. Chashchin A. N. Using remote sensing data to assess the rate of self-healing of coal dumps in the Kizel basin / A. N. Chashchin, M. A. Kondratieva // Geographical Bulletin. – 2019. – No. 2 (49). – P. 135–147.

12. Deforestation and Loss of Biodiversity Surrounds the Ethiopian Church Forests // Tree foundation. – 2013. – URL: <http://treefoundation.org/projects/churchforests-of-ethiopia/regional-view-of-deforestation/> (дата обращения: 27.01.2020).
13. Accumulation of undergrowth on the dumps of the chrysotile-asbestos Deposit / Yu. V. Zaripov, E. S. Zalesova, S. V. Zalesov, E. P. Platonov // Successes of modern natural science. – 2019. – No. 7. – P. 21–25.
14. Zalesov, S. V. Natural recultivation of overburden dumps and waste of asbestos ore enrichment / S. V. Zalesov, Yu. V. Zaripov, E. S. Zalesova // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2017. – No. 3 (157). – P. 35–38.
15. Zalesov, S. V. Analysis of the state of the undergrowth of the hanging birch (*Betula pendula* Both.) on the dumps of chrysotile-asbestos deposits in terms of fluctuating asymmetry / S. V. Zalesov, Yu. V. Zaripov, E. A. Frolova // Bulletin of the Buryat state agricultural Academy named after V. R. Filippov. – 2017. – No. 1 (46). – P. 71–77.

---

УДК 630\*524.39+630\*174.754

## О ПРОДУКТИВНОСТИ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА ДРЕВОСТОЕВ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСНЫ И БЕРЕЗЫ

В. А. УСОЛЬЦЕВ – доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор кафедры прикладной информатики  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,  
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

главный научный сотрудник  
ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН»  
620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а,  
тел.: 8 (343) 254-61-59, e-mail: Usoltsev@mail.ru

А. Ф. УРАЗОВА – кандидат сельскохозяйственных наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства,  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,  
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37,  
тел.: 8 (343) 254-61-59, e-mail: ura-alina@mail.ru

А. В. БОРНИКОВ – кандидат сельскохозяйственных наук,  
старший преподаватель  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,  
460014, Россия, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18,  
тел.: 8 (353) 277-71-94, e-mail: bornikov87@mail.ru

**Ключевые слова:** продуктивность хвой, древостои сосны обыкновенной и березы повислой, медеплавильный завод, атмосферное загрязнение, индекс токсичности, модельные деревья, пробные площади, регрессионный анализ.

Проблема загрязнения окружающей среды стоит в ряду важнейших экологических проблем, связанных с антропогенным воздействием на биосферу. Интегральным показателем, отражающим природное и антропогенное воздействия на лесные экосистемы, является их биологическая продуктивность,