

Научная статья

УДК 630*57

doi: 10.34655/bgsha.2023.72.3.011

СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ИХ ДИНАМИКА В ЗОНЕ АЭРОПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Антон Александрович Николаев¹, Валерий Владимирович Фомин²

^{1,2}Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

¹nikolaevaa@m.usfeu.ru

Аннотация. Проведено исследование состояния еловых лесных насаждений, длительное время находящихся под влиянием аэропромышленных загрязнений медеплавильного производства – Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ). Оценка состояния лесных насаждений выполнена с использованием усовершенствованного индекса влажности EWDI на основе данных спутниковой съемки Landsat TM/ETM за период с 1990 по 2020 год в пределах лесных выделов с использованием электронной карты границ лесотаксационных выделов. Снижение значений индекса EWDI свидетельствует об улучшении состояния растительности относительно значений компоненты влажности 1988 года. Среднеуральский медеплавильный завод – основной источник аэропромвыбросов в районе исследований в 2010 году перешел на новую технологию производства продукции, которая позволила существенно сократить объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. В ходе проведенных исследований установлена тенденция улучшения состояния еловых насаждений как непосредственно в импактной зоне, так и буферной. За исследуемый временной интервал площадь насаждений, на которых улучшилось состояние, увеличилась на 43,1%, из них 21,4% приходится на насаждения со значительным улучшением состояния. Улучшение состояния лесных насаждений наиболее значительно выражено в импактной зоне после 2010 года, среднее значение индекса в насаждениях 1-километровой зоне вокруг завода изменилось с 4,95 в 1996 году до -21,10 относительных единиц в 2020 году, при изменениях в фоновой 30-километровой зоне с -13,09 в 1996 году до -29,51 относительных единиц в 2020 году.

Ключевые слова: состояние лесных насаждений, аэропромышленные загрязнения, усовершенствованный индекс влажности, пространственно-временная динамика, Средний Урал.

Благодарности: Авторы благодарят руководство и сотрудников Уральского филиала ФГУП Рослесинфорг за помощь в предоставлении данных о лесных насаждениях. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектов FEUG-2023-0002. Часть исследований, связанных с оценкой состояния лесных насаждений в районах расположения участков карбонового полигона, выполнена в рамках проекта FEUZ-2021-0014.

Original article

FOREST STANDS STATE AND THEIR DYNAMICS IN THE AREA OF AERIAL POLLUTION

Anton A. Nikolaev¹, Valery V. Fomin²

^{1,2} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

¹nikolaevaa@m.usfeu.ru

Abstract. *The assessment of the state of spruce forests in areas of air pollution impacted by the Middle Ural Copper Smelting Plant (MUCSP) was carried out. Based on the improved wetness difference index (EWDI) using Landsat TM/ETM data and forest inventory materials, spruce stands state were analyzed for the period from 1990 to 2020. Decrease of EWDI index rate shows the improvement of forest stands state if compare it with the index rate of 1988. The Middle Ural Copper Smelting plant is the main source of air pollution in the studied area. The new production technology, which is characterized by a low level of emissions of pollutants into the atmosphere, was introduced here in 2010. Under the research, the tendency of spruce forest state improvement was revealed both in the impact and buffer areas. During the period of study, the area of spruce forests where the state of forest stands were improved increased by 43.1%, where 21.4% accounted for forests with a significant improvement of their state. The improvement of forest stands state is most significantly expressed in the impact zone around the plant after 2010. The average value of EWDI in the 1-kilometer impact zone changed from 4.95 in 1996 to -21.10 relative units in 2020, with changes in the background 30 kilometer zone from -13.09 in 1996 to -29.51 relative units in 2020.*

Keywords: forest stands state, air pollution, advanced wetness difference index, spatio and temporal dynamics, the Middle Urals

Acknowledgments: Authors acknowledge authorities and members of the Urals branch of FSUE Roslesinforg for assistance in data providing concerning forest stands. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the FEUG-2023-0002 projects. A part of the research work connected with forest stands state in the areas within the carbon polygon was carried out within the framework of the FEUZ-2021-0014 project.

Введение. Комплексная оценка негативного влияния выбросов Среднеуральского медеплавильного завода на состояние компонентов лесных биогеоценозов была проведена в середине 1990-х годов [1], позднее на основе данных снегомерных исследований [2] установлено негативное воздействие аэропромышленных загрязнений на все компоненты окружающей природной среды. Использование методов оценки состояния древостоев по комплексу морфометрических характеристик, полученных на основе данных пробных площадей и последующее зонирование всей территории на ее основе, является действенным, но затратным способом. Это обусловлено трудоемкостью выполнения полевых исследований на

большом количестве пробных площадей, закладка которых необходима для учета особенностей типов условий местопроизрастания и структуры древостоев.

Применение цифровых данных спутниковой съемки позволяет ускорить процесс оценки состояния лесных насаждений их гибели [3], наличие разновременных данных позволяет производить оценку динамики лесных площадей [4 - 6]. Выявление нарушенных участков лесного покрова по цифровым данным космической съемки возможно по оценке изменения спектральной отражательной способности лесных насаждений [7, 8] и при использовании спектральных индексов и коэффициентов [9].

Цель исследования – оценка дина-

мики состояния еловых насаждений в зоне действия антропогенных факторов, включая агропромышленное загрязнение крупного медеплавильного производства.

Объекты и методы исследования.

Объектом исследований являются еловые насаждения, расположенные на различном удалении от крупного источника загрязнения атмосферы – Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ). Исследование состояния еловых насаждений за 30-летний период и их динамика на прилегающей к СУМЗу территории проведено в 4549 лесотаксационных выделах на общей площади 22 297,0 га. Средние таксационные характеристики еловых насаждений района исследований по данным лесоустройства 1996 года: средний диаметр – 19,1 см; средняя высота – 16,5 м; средний возраст – 84 года; средняя полнота – 0,68; средний класс бонитета – 2,7.

Основным компонентом в структуре выбросов СУМЗа является сернистый ангидрид. Влияние аэропромышленных загрязнений СУМЗа на компоненты окружающей природной среды ранее были изучены на основе разделения территории на зоны негативного воздействия: импактная – 1-километровая и 2-километровая, буферная – 4-километровая и 7-километровая и 30-километровая фоновая зона [10]. Указанное разделение было использовано при анализе состояния лесных насаждений и их динамики на фоне уменьшения объема выбросов СУМЗа, на основе данных спутниковой съемки Landsat TM/ETM за период с 1990 по 2020 год.

В ходе исследования подготовлена электронная карта границ лесных участков – лесотаксационных выделов еловых насаждений района исследований относительно зон негативного воздействия. Оценка состояния лесных насаждений проводилась при использовании данных усовершенствованного индекса влажности EWDI за 30-летний период (с 1990 по 2020 год при обработке спутниковых снимков серии Landsat TM [11], вычисленного для каждого лесотаксационного выдела.

Индекс EWDI основан на применении преобразования изображения Каута-Томаса с использованием алгоритма Tasseled Cap [12], разработанного и адаптированного для данных дистанционного зондирования, полученных со спутника Landsat [13]. Использование алгоритма Tasseled Cap при преобразовании цифровых данных космической съемки обеспечивает более высокую точность дешифрирования структуры лесных насаждений, определения границ различных объектов, имеющих различия в отражающем спектре [14].

Значения индекса EWDI по годам определены как разность полученных значений индекса влажности КТЗ (компонента преобразования изображения) для каждого пиксела двух космических снимков одного и того же участка местности за период с 1988 по 2020 год, при этом расчет индекса произведен относительно данных компоненты влажности 1988 года.

Изменения значений индекса EWDI указывает на величину разницы влажности между датами двух изображений. Изменение значений влажности между двумя датами является общим показателем, так как компонента влажности фиксирует изменения в среднем инфракрасном диапазоне и считается наиболее последовательным индикатором изменений состояния лесных насаждений [15].

Результаты и обсуждение. Распределение лесных насаждений района исследований по типам леса проанализировано на основе электронной карты границ насаждений и характеризуется тем, что 46,3% площади участков относится к ельнику-сосняку травяному (ЕСтр), 12% – к ельнику разнотравно-зеленомошниковому (Ерзм), 5,2 % – к ельнику-сосняку ягодниковому (ЕСяг).

В таблице 1 приведены статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI в 1990 – 2020 годы с интервалом 2 – 8 лет, а на рисунке 1 – графики хода значений индекса за этот период.

Таблица 1 – Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для еловых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода

Параметр	Значение показателя в годах						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	10	10	10	10	10	10	10
Минимальное значение	-30,27	-26,53	-35,75	-35,26	-66,06	-50,84	-59,86
Максимальное значение	-3,06	44,35	37,15	62,38	18,55	21,69	8,06
Среднее значение	-3,72	4,95	-0,05	3,85	-17,72	-17,97	-21,10
Стандартное отклонение	2,45	4,45	2,25	3,43	18,24	15,28	20,58
Коэффициент вариации	-0,66	0,9	-45,0	0,89	-1,03	-0,85	-0,97
Ошибка среднего	0,77	1,41	0,71	1,08	5,77	4,83	6,51
Импактная 2 км зона							
Количество участков	38	38	38	38	38	38	38
Минимальное значение	-33,12	-31,09	-42,91	-38,91	-67,92	-67,00	-75,86
Максимальное значение	8,19	58,50	56,51	62,64	23,57	18,12	-3,55
Среднее значение	-4,50	2,57	-5,67	-4,36	-25,56	-23,57	-26,17
Стандартное отклонение	3,77	1,88	4,06	3,44	15,25	14,54	13,16
Коэффициент вариации	-0,84	0,73	-0,72	-0,79	-0,6	-0,62	-0,5
Ошибка среднего	0,61	0,30	0,66	0,56	2,47	2,36	2,13
Буферная 4 км зона							
Количество участков	165	165	165	165	165	165	165
Минимальное значение	-26,62	-46,63	-50,73	-49,27	-68,62	-62,33	-72,67
Максимальное значение	28,60	70,62	73,85	37,65	-12,44	-4,71	9,72
Среднее значение	-2,91	-7,68	-12,54	-12,42	-30,00	-28,39	-28,64
Стандартное отклонение	2,61	7,62	8,38	12,04	11,07	10,88	12,98
Коэффициент вариации	-0,89	-0,99	-0,67	-0,97	-0,37	-0,38	-0,45
Ошибка среднего	0,20	0,59	0,65	0,94	0,86	0,85	1,01
Буферная 7 км зона							
Количество участков	269	269	269	269	269	269	269
Минимальное значение	-84,92	-86,60	-80,78	-85,95	-112,05	-102,14	-103,38
Максимальное значение	80,25	58,89	31,99	96,13	48,39	29,03	35,04
Среднее значение	-5,80	-10,95	-14,83	-8,49	-22,22	-20,84	-21,07
Стандартное отклонение	4,49	10,71	13,86	7,77	17,64	16,03	17,62
Коэффициент вариации	-0,77	-0,98	-0,93	-0,92	-0,79	-0,77	-0,84
Ошибка среднего	0,27	0,65	0,85	0,47	1,08	0,98	1,07
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	4067	4067	4067	4067	4067	4067	4067
Минимальное значение	-191,75	-139,23	-159,85	177,48	-195,72	-182,07	-165,59
Максимальное значение	102,32	95,39	104,65	92,80	97,13	121,90	195,13
Среднее значение	-10,33	-13,09	-17,23	-16,20	-29,24	-26,11	-29,51
Стандартное отклонение	9,69	12,19	16,69	14	26,38	25,13	25,49
Коэффициент вариации	-0,94	-0,93	-0,97	-0,86	-0,9	-0,96	-0,86
Ошибка среднего	0,15	0,19	0,26	0,22	0,41	0,39	0,40

Анализ данных таблицы 1 и рисунка 1 свидетельствуют о снижении значений показателя EWDI за 30-летний период. При этом с 1990 по 2010 год в импактных зонах 1 и 2 км состояние еловых насаждений не изменялось, а с 2010 (завершение перехода СУМЗа на новую технологию

производства) до 2015 года наблюдается кратное снижение величины данного показателя. Состояние насаждений в буферных и фоновых зонах также улучшалось, но более плавно. При этом тенденцию улучшения состояния можно наблюдать и до 2010 года.

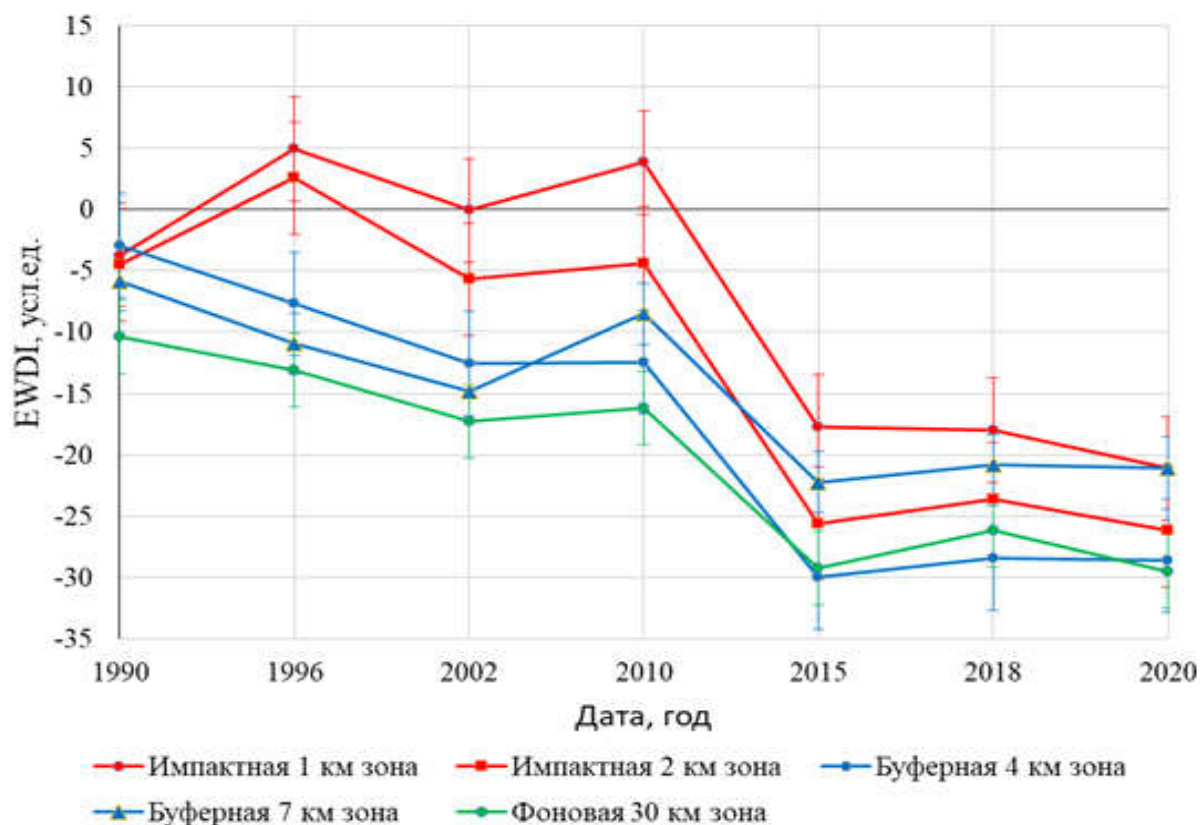


Рисунок 1. Графики изменения значений индекса EWDI для еловых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения. Усами на графиках обозначена ошибка среднего

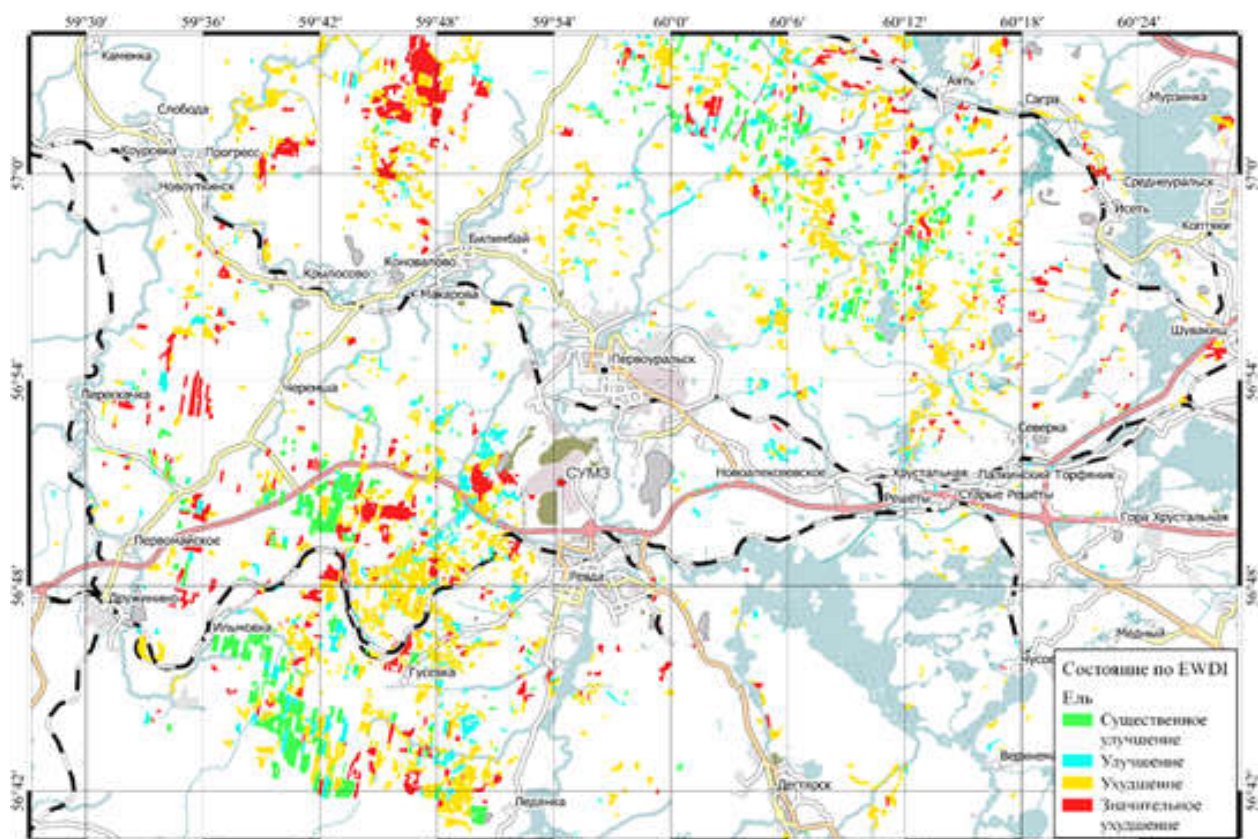
В целом, в 1990-е годы объемы выбросов СУМЗа снижались естественным образом из-за снижения объема производства по сравнению с советским периодом. Этим можно объяснить факт улучшения состояния в буферной и фоновой зонах. При этом, можно предположить, что, несмотря на снижение объемов выбросов, уровень загрязнения в импактных зонах оставался по-прежнему высоким. Вторым предположением для объяснения данного факта является то, что многолетнее загрязнение компонентов лесных насаждений привели к накоплению поллютантов в них, и даже положительный эффект от некоторого снижения уровня выбросов не может проявиться из-за влияния накопленных ранее поллютантов.

Анализ данных по 30-летней динамике состояния еловых насаждений подтверждает факт улучшения их состояния в целом (см. рис. 2). Наиболее значительные улучшения состояния исследуемых насаждений установлены также после

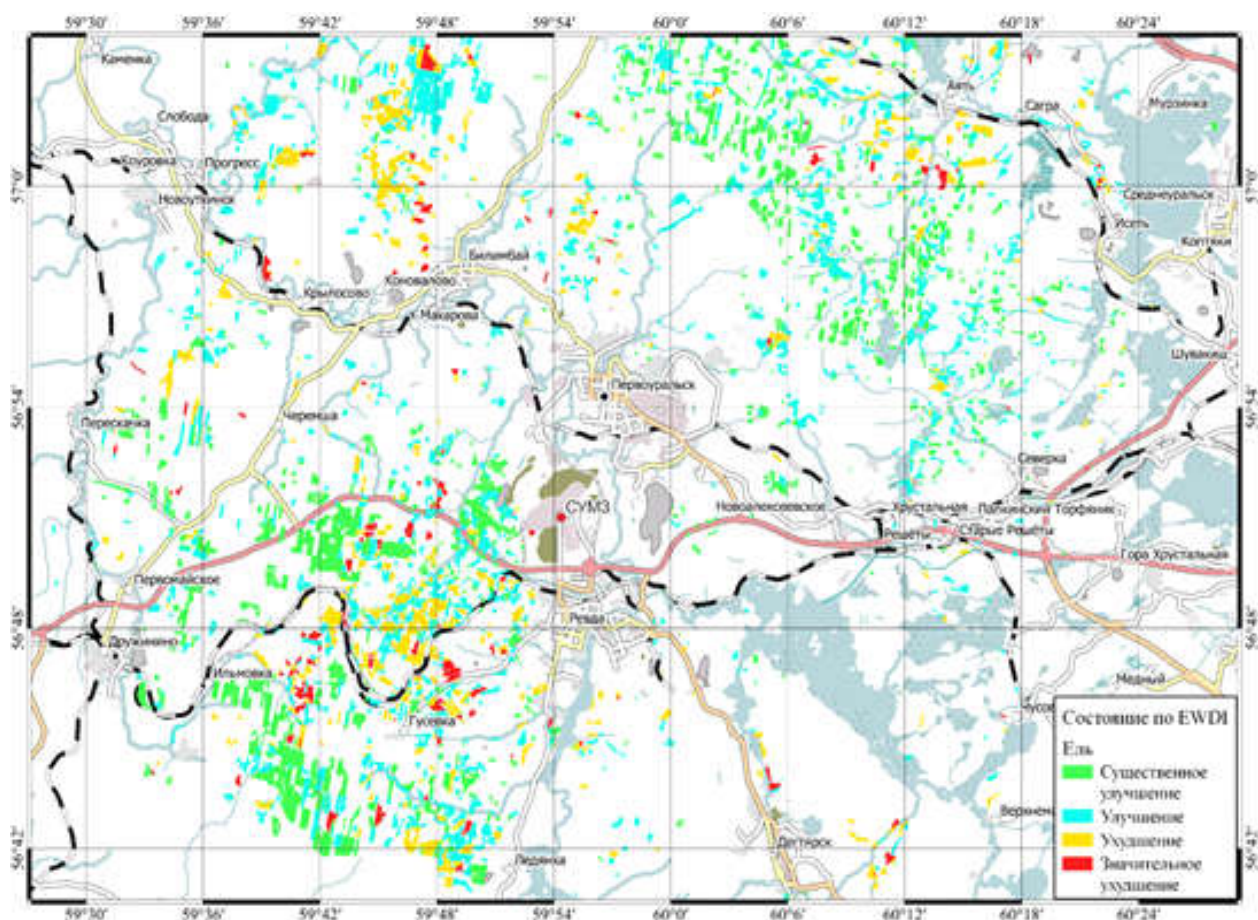
2010 года. Выявленное улучшение состояния лесных насаждений на фоне уменьшения количества промышленных выбросов в атмосферу согласуется с ранее проведенными исследованиями природной среды вблизи СУМЗа [16].

На рисунке 1 можно видеть, что в районе участков карбонового полигона Свердловской области (Коуровка и Северка) в 1996 году можно наблюдать ухудшение состояния, а 2020 году – улучшение. Необходимо учесть влияния антропогенных факторов, включая аэропромышленные загрязнения, на состояние лесных насаждений при оценке депонирования углерода лесными насаждениями в рамках реализации стратегии низкоуглеродного развития РФ.

Анализ величины площадей еловых насаждений, отнесенных к разным категориям состояния за 30-летний период (см. табл. 2), свидетельствует об увеличении площадей с улучшенным и значительным улучшенным состоянием (рис. 2).



А



Б

Рисунок 2. Картосхемы состояния еловых насаждений на 1996 (А) и 2020 (Б) год, составленные на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI

Таблица 2 – Динамика изменения площадей еловых насаждений по категориям состояния определенных по значению усовершенствованного индекса влажности EWDI на 2020 год

Категория состояния	Год оценки состояния				Динамика изменения площади на 2020 год		
	1996		2020		га	% от 1996 года	% от общей площади
	га	%	га	%			
Значительное улучшение	4892,0	21,9	9658,0	43,3	+4766,0	+97,4	+21,4
Улучшение	3177,0	14,3	8011,0	35,9	+4834,0	+152,2	+21,7
Ухудшение	9567,0	42,9	3679,0	16,5	-5888,0	-61,5	-26,4
Значительное ухудшение	4661,0	20,9	949,0	4,3	-3712,0	-79,6	-16,6
Итого	22297,0	100,0	22297,0	100,0			

Распределение еловых насаждений по категориям состояния, оцененных по значениям усовершенствованного индекса влажности EWDI на 1996 год, характеризуется тем, что состояние 63,8% еловых насаждений относится к двум категориям с ухудшением состояния относительно 1988 года. При этом всего 21,9% еловых насаждений относятся к категории со значительным улучшением состояния.

Состояние еловых насаждений за 30-летний период существенно изменилось: наблюдается положительная динамика по улучшению состояния участков. Состояние еловых насаждений в 2020 году характеризуется уменьшением площади участков со значительным ухудшением состояния на 16,6% от общей площади, или 79,6% от площадей 1996 года. Еловые насаждения с улучшением и со значительным улучшением на 2020 год занимают 79,2% от общей площади еловых насаждений относительно 1988 года.

Заключение. Использование разновременных данных цифровой космической съемки обеспечивает определение состояния лесных насаждений на значительных по площади территориях при минимальных затратах времени и ресурсов. Впервые проведен анализ динамики состояния еловых насаждений в зоне промышленного загрязнения медеплавильного производства на Среднем Урале за 30-летний период, по материалам цифровой космической съемки Landsat TM. Использование усовершенствованного ин-

декса влажности EWDI позволяет количественно оценивать состояние еловых насаждений в зонах действия аэропромышленных загрязнений медеплавильного производства. Установлено существенное улучшение состояния еловых насаждений в импактной, буферной и фоновой зонах после введения в 2010 году на Среднеуральском медеплавильном заводе природосберегающих технологий.

Список источников

1. Фомин В.В. Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века / Российская академия наук, Уральское отделение, Институт экологии растений и животных. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2009. 150 с. EDN: QKSTAV
2. Николаев А.А., Николаева И.О. Оценка состояния экосистем промышленных территорий на основе данных снегомерных исследований // Естественные и технические науки. 2021. № 2(153). С. 49-56. EDN: UQCUTO
3. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Бартаев, Ф.В. Стыценко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83-94. EDN: TOASFX
4. Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России / А.С. Плотникова, Д.В. Ершов, А.О. Харитонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 228-240. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240. EDN: EJAHWK.

5. Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W., Campbell L.B. Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring // *International J. Digital Earth*. 2016. V. 9. Pp. 1035–1054.

doi: 10.1080/17538947.2016.1187673.

6. Zhao F., Huang C., Goward S.N., Schleeweis K., Rishmawi K., Lindsey M.A., Denning E., Keddell L., Cohen W.B., Yang Z., Dungan J.L., Michaelis A. Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP) // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 209. Pp. 312–326. doi: 10.1016/j.rse.2018.02.035

7. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134. EDN: WMIXJZ.

8. Бондур В.Г. Космический мониторинг импактных районов Арктики / В.Г. Бондур, В.Е. Воробьев // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 4. С. 4–24. doi: 10.7868/S0205961415040028. EDN: UDEYQH.

9. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозеленых лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / Ф.В. Стыценко, С.А. Барталев, А.В. Букась [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 217–227. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227. EDN: CBLFNL.

10. Воробейчик Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов; Российская академия наук, Уральское отделение, институт экологии растений и животных, концерн «Промэкология». Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.

EDN: QZAOCH.

11. United States Geological Survey (USGS) URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 01.10.2020).

12. Kauth R.J. The Tasseled Cap – A Graphical Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT / R.J. Kauth, G.S. Thomas. In: *Proceedings of the Symposium on Machine*

Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1976. Pp. 4B41–4B51. doi: 10.1.1.461.6381

13. Franklin S.E. Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index: (EWDI) to temporal resolution / S.E. Franklin, C.B. Jagielko, M.B. Lavigne // *Canadian Journal Remote Sensing*. 2005. V. 32. № 2. Pp. 149–152. doi: 10.5589/m05-005

14. Николаев А.А., Николаева И.О. Преобразование цифровых данных космической съемки алгоритмом Tasseled Cap при определении структуры лесных насаждений // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 9 (123). С. 1–5.

doi: 10.23670/IRJ.2022.123.77.

EDN: ERWDVO.

15. Collins J.B. & Woodcock C.E. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multi-temporal Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 1996. 26, 66 – 77. doi: 10.1016/0034-4257(95)00233-2

16. Воробейчик Е.Л., Кайгородова С.Ю. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов // *Почвоведение*. 2017. № 8. С. 1009–1024. doi: 10.7868/S0032180X17080135.

EDN: ZCJMSN.

References

1. Fomin V.V. Climate driven and anthropogenic spatio-temporal dynamics of tree vegetation in the second half of the XXth century. Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Institute of Plant and Animal Ecology. Ekaterinburg. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2009. 150 p. (In Russ.).

2. Nikolaev A.A., Nikolaeva I.O. Assessment of the state of ecosystems of industrial territories based on data from snow. *Natural and technical sciences*. 2021; 2(153):49–56 (In Russ.).

3. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality. *Lesovedenie*. 2015;2:83–94 (In Russ.).

4. Plotnikova A.S., Ershov D.V., Haritonova A.O., Shuljak P.P., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Spatial assessment of modern forest fire regimes in Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. 2019;16(5):228–240 (In Russ.).

5. Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W., Campbell L.B. Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring. *International J. Digital Earth*. 2016;9:1035–1054.
6. Zhao F., Huang C., Goward S.N., Schleeweis K., Rishmawi K., Lindsey M.A., Denning E., Keddell L., Cohen W.B., Yang Z., Dungan J.L., Michaelis A. Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP). *Remote Sensing of Environmen.* 2018;209:312–326.
7. Vorobyov O.N., Kurbanov E.A., Polevshnikova Y.A., Lezhnin S.A. Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. 2016;13(4):124–134 (In Russ.).
8. Bondur V.G., Vorobyov V.E. Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2015;4:4–24 (In Russ.).
9. Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. The possibilities of prolonged burnt severity assessment of evergreen coniferous forest using multi-spectral satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. 2019;16(5):217–227 (In Russ.).
10. Vorobeichik E.L., Sadykov O.F., Farafontov M.G. Ecological standardization of terrestrial ecosystems technogenic pollution (local scale). Ekaterinburg. Nauka. 1994. 280 p. (In Russ.).
11. United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
12. Kauth R.J., Thomas G.S. The Tasseled Cap – A Graphical Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. *Proc. of Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1976. Pp. 4B41-4B51.
13. Franklin S.E., Jagielko C.B., Lavigne M.B. Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index: (EWDI) to temporal resolution. *Canadian Journal Remote Sensing*. 2005;32(2):149-152.
14. Nikolaev A.A., Nikolaeva I.O. Digital space footage data transformation by Tasseled Cap algorithm in determination of forest plantation structure. *International research journal*. 2022;9(123):1-5 (In Russ.).
15. Collins J.B. & Woodcock C.E. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multi-temporal Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*. 1996;26:66–77.
16. Vorobeichik E.L., Kaigorodova S.Y. Long-term dynamics of heavy metals in the upper horizons of soils in the region of a copper smelter impacts during the period of reduced emission. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(8):977-990.

Информация об авторах

Антон Александрович Николаев – директор научно-образовательного центра «Лес-ТехПроект», nikolaevaa@m.usfeu.ru;

Валерий Владимирович Фомин – доктор биологических наук, доцент, проректор по научной работе и инновационной деятельности, fominvv@m.usfeu.ru.

Information about the authors

Anton A. Nikolaev – Director of the Scientific and educational center “LesTechProject”, nikolaevaa@m.usfeu.ru;

Valeriy V. Fomin – Doctor of Science (Biology), Associate Professor, Vice-Rector for Research and Innovations, fominvv@m.usfeu.ru.

Статья поступила в редакцию 18.04. 2023; одобрена после рецензирования 23.06.2023; принята к публикации 04.07. 2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication 04.07.2023.