



Защитное лесоразведение Protective afforestation








DOI: 10.22363/2312-797X-2023-18-3-361-372

EDN: NWPPYB

УДК 630


Научная статья / Research article

Применение ГИС-технологий при обследовании состояния лесных культур в зеленой зоне г. Астаны

А.Н. Кабанов¹  , А.С. Оспангалиев² , С.А. Кабанова¹ ,
И.С. Кочегаров¹ , А.М. Бекбаева² , М.А. Данченко³ 

¹Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации
им. А.Н. Букейхана, г. Щучинск, Казахстан

²Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, г. Астана,
Казахстан

³Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация
 7058613132@mail.ru

Аннотация. В лесном хозяйстве постоянный мониторинг состояния и роста растений играет немаловажную роль. Для эффективного устойчивого управления лесными ресурсами в современном мире существует множество источников открытых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющего вести наблюдения за древесной растительностью на обширных территориях. Цель исследования — выявление площадей ослабленных и погибающих лесных культур в зеленой зоне города Астаны — лесничестве Батыс — с помощью данных ДЗЗ. Полученные сведения будут использованы для разработки дальнейших мероприятий по восстановлению и повышению устойчивости искусственных насаждений. Проведено сравнение данных ДЗЗ, выполненных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Supercam S350F мультиспектральной камерой Micasense RedEdge, и снимков высокого пространственного разрешения со спутников Sentinel-2 и PlanetScope для выбора оптимального метода решения поставленных задач. По материалам мультиспектральной съемки выявлено процентное отношение состояния лесных культур лесничества Батыс, где 35 % лесных насаждений относятся к категории здоровых, 30 % — ослабленных и 35 % — погибающих.

© Кабанов А.Н., Оспангалиев А.С., Кабанова С.А., Кочегаров И.С., Бекбаева А.М., Данченко М.А., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: данные ДЗЗ, дистанционное зондирование, жизненное состояние, лесное хозяйство, геоинформационные системы





Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Благодарности. Данное исследование финансируется Министерством экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан (№ BR10263776).

История статьи: поступила в редакцию 22 апреля 2022 г., принята к публикации 20 июля 2023 г.

Для цитирования: Кабанов А.Н., Оспангалиев А.С., Кабанова С.А., Кочегаров И.С., Бекбаева А.М., Данченко М.А. Применение ГИС-технологий при обследовании состояния лесных культур в зеленой зоне г. Астаны // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023. Т. 18. № 3. С. 361—372. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-3-361-372


Application of GIS technologies in surveying the state of forest crops in the green zone of Astana

Andrey N. Kabanov¹  , Askhat S. Ospangaliev² ,
Svetlana A. Kabanova¹ , Igor S. Kochegarov¹ ,
Aigul M. Bekbaeva² , Matvey A. Danchenko³ 

¹A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, *Shchuchinsk, Kazakhstan*

²S. Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University, *Astana, Kazakhstan*

³Tomsk State University, *Tomsk, Russian Federation*

 7058613132@mail.ru

Abstract. When carrying out forestry, constant monitoring of plant condition and growth is very important. There is a wide range of Earth remote sensing sources for effective management of woody vegetation in vast areas. The purpose of the study was to identify areas with weakened and dying tree crops in the green observation zone of Astana, Kazakhstan, covering ‘Batys’ forestry using remote sensing data. The results of studies carried out for research on the growth and development of artificial plantations were obtained. During the experiment, a comparison of remote sensing data was performed using an unmanned aerial vehicle Supercam S350F with multispectral camera Micasense RedEdge and high-resolution measurements obtained with Sentinel-2 and PlanetScope satellites in order to select a method for solving the tasks. Based on the materials of multispectral diagnostics, the state of forest plantations in ‘Batys’ forestry was revealed, where 35 % of tree crops were classified as healthy, 30 % — as weakened, and 35 % — as dying.

Keywords: earth remote sensing data, remote sensing, vital state, forestry, geoinformation systems

Conflicts of interest. The authors declared no conflicts of interest.

Acknowledgments. The research was funded by the Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan (No. BR10263776).

Article history: Received: 22 April 2022. Accepted: 20 July 2023.

For citation: Kabanov AN, Ospangaliev AS, Kabanova SA, Kochegarov IS, Bekbaeva AM, Danchenko MA. Application of GIS technologies in surveying the state of forest crops in the green zone of Astana. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2023; 18(3):361—372. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-3-361-372

Введение

Создание зеленой зоны вокруг столицы Казахстана начато в 1997 г., после подписания решения Президента Республики о посадке лесного массива. Сейчас около 100 000 гектаров занято искусственными лесами, которые практически со всех сторон опоясывают город. Леса обеспечивают природно-климатические и социокультурные условия для рекреационной деятельности человека и содержат большую часть всего земного углерода (C) [1].

Зеленая зона расположена в сухостепной зоне, характеризуется резко-континентальным климатом с холодной зимой и жарким летом. Ощущается дефицит влаги, среднегодовая сумма осадков не превышает 300 мм. В отдельные годы продолжительность засушливых периодов достигает 60 дней. Максимальная летняя температура составляет +42 °С, минимальная зимняя — –49 °С. Продолжительность периода с температурой выше +10 °С (вегетационный период) составляет 137 дней.

Особенностью климата является активный в течение всего года ветровой режим. Зимой преобладают ветры западного направления, которые переносят зимние осадки, а летом — пыльные бури. По причине климатических условий искусственные леса были созданы по принципу полезащитных насаждений с кулисами шириной до 24 м и межкулисным пространством до 12 м. Кулиса состоит из 4...6 рядов древесных пород с размещением 1 × 4 м и 1–2 рядов из кустарниковых пород с размещением 0,5 × 4 м.

Зональные почвы — темно-каштановые, встречаются лугово-каштановые и луговые почвы, солонцы и солончаки. Мозаичность почв и их неоднородность диктует выбор ассортимента наиболее засухо- и солеустойчивых древесных и кустарниковых пород.

По степени лесопригодности почвы разделены на 4 группы: лесопригодные (удовлетворительные лесорастительные условия), ограниченно-лесопригодные (средняя степень засоленности почвы), условно-лесопригодные (значительная солонцеватость и засоленность почвы) и нелесопригодные (солонцы, солончаки и болота). Основную территорию зеленой зоны занимают нелесопригодные почвы (41,4 %), наименьшую часть — лесопригодные почвы (8,5 %). На долю ограниченно- и условно-лесопригодных почв приходится соответственно 13,4 и 36,7 % [2].

Первоначально было испытано 104 вида древесных и кустарниковых растений, рекомендовано для посадки 28 пород, наиболее устойчивых к неблагоприятным почвенно-климатическим условиям. Наибольшую площадь занимают посадки *Betula pendula* Roth. (18,6 %), *Acer negundo* L. (18,5 %), *Ulmus pumila* L. (18,1 %)

и *Elaeagnus angustifolia* L. (10,0 %) [3]. Остальные древесные породы занимают незначительное количество в ассортименте зеленой зоны. Из кустарников можно выделить *Ribes aureum* Pursh (5,6 %) и *Prunus fruticosa* Pall. (4,8 %), которые имеют высокую сохранность и хорошо плодоносят, что позволяет жителям собирать плоды. В искусственных лесах зеленой зоны растет более 9 миллионов 600 тысяч деревьев и около 1 миллиона 800 тысяч кустарников.

В рамках «зеленого пояса» территория РГП «Жасыл аймақ» разделена на 8 лесничеств: «Кызылжарское», «Ерейментауское», «Аршалынское», «Вячеславское», «Бозайгырское», «Астанинское» и «Батыс». Эти участки окружают весь периметр города Астаны.

Цель исследования — определение состояния зеленых насаждений в пилотном лесничестве с помощью ГИС-технологий.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований являлись искусственные насаждения зеленой зоны г. Астаны, расположенные в лесничестве «Батыс» РГКП «Жасыл Аймақ». Лесные культуры были созданы в 2010 г. на ограниченно-лесопригодных почвах. По фенотипическим признакам деревьев и их сохранности насаждения предварительно были разделены на здоровые, ослабленные и погибающие. В ходе дальнейших наблюдений, перечета деревьев и разделения их по категориям состояния определена оценка жизненного состояния (ОЖС) насаждений по методике В.А. Алексеева [4].

$$L = \frac{100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 4n_4}{N}, \quad (1)$$

где L — относительное жизненное состояние древостоя, рассчитанное по числу деревьев; n_1 — число здоровых; n_2 — ослабленных; n_3 — сильно ослабленных; n_4 — отмирающих деревьев; N — число деревьев на пробной площади.

При индексе жизненного состояния от 100 до 80 насаждение характеризуется как здоровое, от 79 до 50 — ослабленное, от 49...20 — очень ослабленное или погибающее.

После оценки в насаждениях различного санитарного состояния закладывали пробные площади с пространственной привязкой границ к системе координат в формате WGS-84. Размер пробных площадей зависел от числа деревьев, произрастающих на них, и был не меньше 30 × 30 м. Согласно методике Огиевского [5], на пробе было не менее 100 деревьев. Участки должны быть расположены в разнородных лесных насаждениях, на расстоянии более 3 м от дорог и распределены по всей исследуемой территории. На пробных площадях, которые служили эталонными участками для определения вегетационного индекса, выполнили таксационные замеры высоты и диаметра деревьев, посчитали сохранность деревьев. Диаметр деревьев измеряли штангенциркулем с точностью ± 1 см, высоту — высотомером

с точностью ± 5 см. Сохранность характеризовалась отношением сохранившихся растений к числу посаженных и определялась по формуле

$$C = \frac{(Ж + \frac{1}{2}С)100}{Ч}, \quad (2)$$

где С — приживаемость, %; Ж — число здоровых растений, шт.; С — число сомнительных растений, шт.; Ч — число посадочных мест, шт.

В табл. 1 приведены показатели жизненного состояния искусственных насаждений в лесничестве «Батыс». Выявлено, что состояние визуально отобранных культур подтверждается математическим вычислением ОЖС. Наилучшим состоянием характеризовались культуры *Acer negundo* L., которые имели жизненное состояние 94,3 %. В данных культурах наблюдалось обильное плодоношение и самосев в рядах и междурядьях. Средняя высота благонадежного подроста составляла 0,56 м.

Таблица 1

Оценка жизненного состояния насаждений лесничества «Батыс», 2010 г.п.

Порода	№ квартала	Всего	Здоровые, шт	Ослабленные, шт	Сильно ослабленные, шт	Погибшие, шт	Сохранность, %	ОЖС, %	Категория состояния
<i>Betula pendula</i>	67	136	102	10	4	20	83.8	81.9	Здоровые
<i>Betula pendula</i>	67	115	45	30	33	7	79.6	69,1	Ослабленные
<i>Betula pendula</i>	74	124	25	10	45	44	46.4	41,7	Погибающие
<i>Acer negundo</i>	62	135	121	9	0	5	96.3	94.4	Здоровые
<i>Acer negundo</i>	66	122	44	47	23	9	45.5	70,8	Ослабленные
<i>Ulmus pumila</i>	63	115	85	15	6	9	89.6	85.4	Здоровые
<i>Ulmus pumila</i>	66	109	40	25	11	33	64.7	58,0	Ослабленные
<i>Ulmus pumila</i>	62	101	23	12	38	28	53.5	47,2	Погибающие

Table 1

Assessment of the state of tree crops in 'Batys' forestry (planting year – 2010)

Species	Quarter, No.	Total	Healthy plants	Weakened plants	Strongly weakened plants	Dead plants	Survival, %	Plant state assessment, %	State category
<i>Betula pendula</i>	67	136	102	10	4	20	83.8	81.9	Healthy
<i>Betula pendula</i>	67	115	45	30	33	7	79.6	69,1	Weakened
<i>Betula pendula</i>	74	124	25	10	45	44	46.4	41,7	Dying
<i>Acer negundo</i>	62	135	121	9	0	5	96.3	94.4	Healthy
<i>Acer negundo</i>	66	122	44	47	23	9	45.5	70,8	Weakened
<i>Ulmus pumila</i>	63	115	85	15	6	9	89.6	85.4	Healthy
<i>Ulmus pumila</i>	66	109	40	25	11	33	64.7	58,0	Weakened
<i>Ulmus pumila</i>	62	101	23	12	38	28	53.5	47,2	Dying

При одинаковых условиях произрастания здоровые насаждения всех изученных древесных пород превышают ослабленные насаждения по высоте на 10,7...29,5 %, по диаметру — на 7,4...13,2 % (табл. 2). Изменчивость высоты в здоровых насаждениях изменяется на среднем уровне (14,5...23,9 %), диаметр — на повышенном уровне (22,7...28,3 %). Коэффициент вариации деревьев в ослабленных насаждениях колеблется на повышенном уровне, что говорит о значительных различиях по росту между деревьями.

Таблица 2

Таксационные показатели лесных культур

Порода	№ квартала	Ср. высота, м		Ср. диаметр, см		Состояние
		$\bar{X} \pm m$	V, %	$\bar{X} \pm m$	V, %	
<i>Betula pendula</i>	67	7,8±0,4	23,9	7,3±0,4	24,6	Здоровые
<i>Betula pendula</i>	67	5,5±0,3	23,6	6,5±0,5	33,9	Ослабленные
<i>Betula pendula</i>	74	5,9±0,4	41,7	4,4±0,2	39,2	Погибающие
<i>Acer negundo</i>	62	3,6±0,10	14,5	3,8±0,2	28,3	Здоровые
<i>Acer negundo</i>	66	2,8±0,16	26,6	3,3±0,3	37,0	Ослабленные
<i>Ulmus pumila</i>	62	5,6±0,25	17,2	8,1±0,5	22,7	Здоровые
<i>Ulmus pumila</i>	63	5,0±0,34	16,7	7,5±0,6	19,1	Ослабленные
<i>Ulmus pumila</i>	66	4,9±0,21	17,0	6,3±0,3	18,8	Погибающие

Table 2

Taxation indicators of forest crops

Species	Quarter no.	Average height, m		Average diameter, cm		Condition
		$\bar{X} \pm m$	V, %	$\bar{X} \pm m$	V, %	
<i>Betula pendula</i>	67	7.8±0.4	23.9	7.3±0.4	24.6	Healthy
<i>Betula pendula</i>	67	5.5±0.3	23.6	6.5±0.5	33.9	Weakened
<i>Betula pendula</i>	74	5.9±0.4	41.7	4.4±0.2	39.2	Dying
<i>Acer negundo</i>	62	3.6±0.10	14.5	3.8±0.2	28.3	Healthy
<i>Acer negundo</i>	66	2.8±0.16	26.6	3.3±0.3	37.0	Weakened
<i>Ulmus pumila</i>	62	5.6±0.25	17.2	8.1±0.5	22.7	Healthy
<i>Ulmus pumila</i>	63	5.0±0.34	16.7	7.5±0.6	19.1	Weakened
<i>Ulmus pumila</i>	66	4.9±0.21	17.0	6.3±0.3	18.8	Dying

Съемка насаждений с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультиспектральной камерой была выполнена на площади 3000 га в лесничестве «Батыс». В результате были получены снимки с пространственным разрешением в 30 см в 5 спектральных каналах (RGB, NIR, RedEdge). Для выявления оптимального качества снимков рассмотрели и сравнили снимки со спутников Sentinel-2 и PlanetScore [6]. Спутник Sentinel-2 оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в т.ч. и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние атмосферы на качество

съемки. Спутники PlanetScope имеют пространственное разрешение 3 м в четырех спектральных каналах (RGB+Nir): синий (0,44–0,51 мкм), зеленый (0,52–0,59 мкм), красный (0,63–0,69 мкм) и ближний инфракрасный (0,76–0,85 мкм). Снимки датировались тем же числом, когда проводились наземные исследования таксационных показателей насаждений и определялись спектральные характеристики ассимиляционного аппарата древесных пород спектрографом Spectral Evolution PSR-1100f [7].

Для объединения растров в единый файл на каждый спектральный канал в программном обеспечении ENVI проводилась бесшовная мозаика растров. Проводилась предварительная обработка для преобразования цифровых данных в коэффициенты отражения и устранение атмосферных помех. Определялся индекс NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), который показывает содержание хлорофилла в растениях и рассчитывается по формуле

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}), \quad (3)$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED — отражение в красной области спектра.

Известно, что характерным признаком растений и их состояния является спектральная отражательная способность [8]. При попадании потока лучистой энергии на поверхности растительности к отраженным лучам присоединяется определенная доля лучей, рассеянных внутренними поверхностями полупрозрачных листьев растений. В отраженном спектре растений довольно отчетливо просматриваются интенсивные полосы поглощения хлорофилла [9]. Клеточная структура здорового растения, в котором много хлорофилла, поглощает красный свет и отражает ближний инфракрасный. На этом основано распределение деревьев по жизненному состоянию [10]. Доказано, что для живой растительности значения NDVI варьируют в диапазоне от 0 до 1.

Так как классификация древесных пород по снимку на одну дату показывает значительные погрешности, снимки по 4 каналам с мая по сентябрь объединялись в один файловый растр инструментом Stack Layer. Обучающими классами в модели были основные лесные породы: *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., *Populus balsamifera* L., *Acer negundo* L., *Ulmus pumila* L. и *Elaeagnus angustifolia* L. Классификация лесных культур по древесным породам и состоянию провели по методу Random forest («случайный лес») [11–13].

Разделение данных производили случайным образом в соотношении 50:50 для создания модели и для ее валидации [14, 15].

Результаты исследований и обсуждение

Проведенным наземным обследованием был выполнен подбор пробных площадей здоровых, ослабленных и погибающих лесных культур как эталонных участков для дальнейшего сопоставления полученных данных с мультиспектральным снимком района исследований.

Мультиспектральная съемка с БПЛА показала, что состояние лесов на исследуемой территории неоднородное и варьирует от $-0,9$ до $0,98$. В диапазоне значений индекса NDVI от $-0,9$ до $0,15$ (выделено красным) явно просматриваются межкулисные пространства и участки насаждений с погибающими (погибшими) деревьями; в диапазоне от $0,7$ до $0,98$ (выделено зеленым) древесные растения имеют здоровое жизненное состояние, что согласуется с данными наземного обследования рассмотренных эталонных участков (рис. 1).

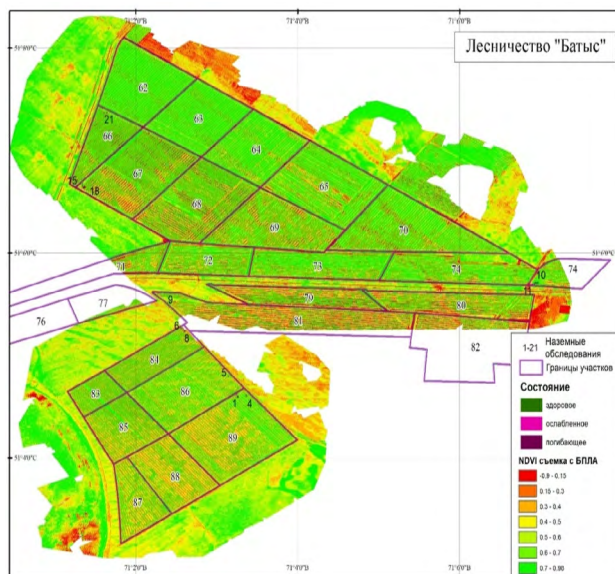


Рис. 1. Вегетационные индексы NDVI лесничества «Батыс» съемка с БПЛА

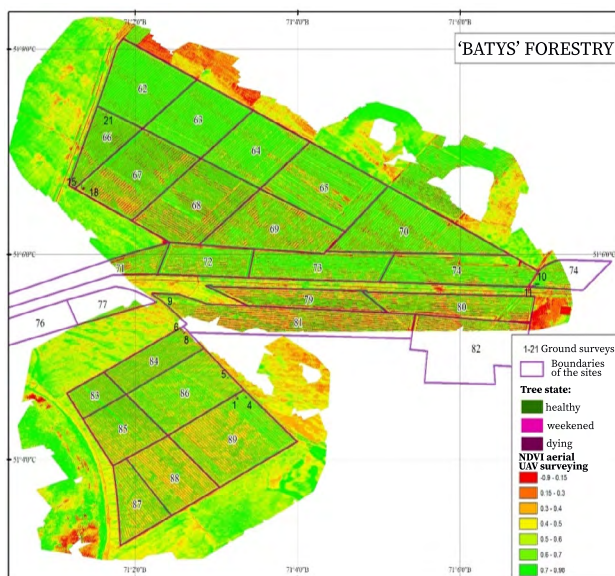


Fig. 1. Vegetation indices NDVI of 'Batys' forestry, UAV data

Изучены спектральные каналы Sentinel-2 по наземным полигонам классам состояния лесных насаждений. Так по рис. 2 видно снижение вегетационных индексов NDVI и VI, а также ближнего инфракрасного канала. В то же время другие спектральные каналы Sentinel-2 не показали зависимого тренда по состоянию пород. В этой связи можно сделать вывод, что применение имеющихся спектральных каналов PlanetScore (RGB, NIR) является достаточным для классификации и мониторинга лесов.

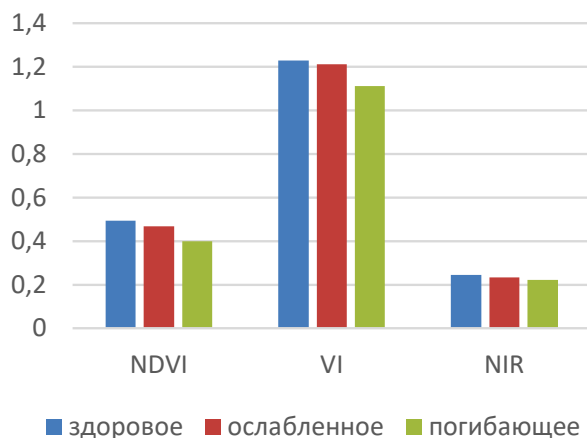


Рис. 2. Сравнение значений пикселей по наземным классам состояния лесов

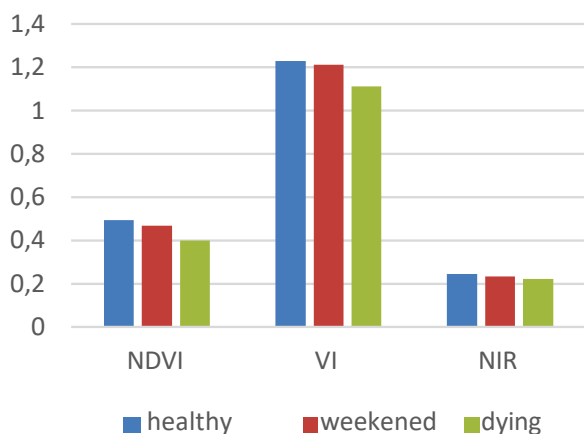


Fig. 2. Comparison of pixel values by terrestrial forest state classes

По результатам классификации «случайный лес» точность классификации снимка PlanetScore по 4 каналам на 3 группы состояния составила 78,3 %, при этом индекс Каппа — 0,675.

Выводы

Установлено, что на всей площади лесничества «Батыс» соотношение участков по породному составу распределилось следующим образом: лесные культуры *Betula pendula* Roth. составили 31,5 %, *Ulmus pumila* L. — 34,0 %, *Populus balsamifera* L. — 18,0 %, *Acer negundo* L. — 14 % и незначительное количество *Fraxinus excelsior* L. — 2,5 %.

На основе выполненных исследований создана карта состояния лесных насаждений лесничества «Батыс» в 2021 г., 35, 30 и 35 % лесных насаждений отнесены соответственно к категориям здоровых, ослабленных и погибающих.

Библиографический список

1. Gower S. Patterns and Mechanisms of the Forest Carbon Cycle // *Annual Review of Environment and Resources*. 2003. № 28. P. 169–204. doi: 10.1146/annurev.energy.28.050302.105515
2. Суюндиков Ж.О. Технология создания и содержания лесонасаждений зеленой зоны г. Астаны // *Технология создания защитных насаждений в пригородной зоне г. Астаны*. Астана, 2012. С. 3–5.
3. Мыкытанов Ж.К., Рахмов Г.А., Байтанаев О.А., Высоцкий А.Н. Создание зеленой зоны города Астаны — прорывной проект искусственного лесоразведения в Казахстане // *Вестник КазНУ. Серия биологическая*. 2011. № 4 (50). С. 15–20.
4. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // *Лесоведение*. 1989. № 4. С. 51–57.
5. Огиевский В.В., Хуров А.А. Обследование и исследование лесных культур. М.: Лесная промышленность, 1964. 49 с.
6. Mancino G., Ferrara A., Padula A., Nole A. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment // *Remote Sensing*. 2020. № 12. doi: 10.3390/rs12020291
7. Broge N.H., Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density // *Remote Sensing of Environment*. 2001. № 76. P. 156–172.
8. Ahammad T. Effect of Chlorophyll Content & Solar Irradiance on Spectral Reflectance of Vegetation Canopies Acquired By Spectro-Radiometer // *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2021. № 9. P. 170–178. doi: 10.30897/ijgeo.958100
9. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // *Journal of Plant Physiol*. 2021. № 160. P. 271–282.
10. Овичинников А.В. Методика экспериментального исследования коэффициентов спектральной яркости материалов и природных фонов // *Журнал радиоэлектроники*. 2021. № 6. doi: 10.30898/1684-1719.2021.6.5
11. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. № 1. P. 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.C. Random Forests. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer-Verlag, 2009. P. 764.
13. Meng J., Li S., Wang W., Liu Q., Xie S., Ma W. Mapping forest health using spectral and textural information extracted from spot-5 satellite images // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. № 9. P. 719.
14. Immitzer M., Atzberger C., Koukal T. Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data // *Remote sensing*. 2012. Vol. 4. № 9. P. 2661–2693.
15. Plakman V., Janssen T., Brouwer N., Veraverbeke S. Mapping species at an individual-tree scale in a temperate forest, using sentinel-2 images, airborne laser scanning data, and random forest classification // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. № 22. P. 3710. doi: 10.3390/rs12223710

References

1. Gower ST. Patterns and Mechanisms of the Forest Carbon Cycle. *Annual Review of Environment and Resources*. 2003;28:169–204. doi: 10.1146/annurev.energy.28.050302.105515

2. Suyundikov ZO. Technology of creation and maintenance of forest plantations of Astana green zone. In: *Tekhnologii sozdaniya zashchitnykh nasazhdenii v prigorodnoi zone g. Astany* [Technologies of creation of protective plantings in the the suburban area of Astana]. Astana; 2012. p.3–5. (In Russ.).
3. Mykytanov ZK, Rakhmov GA, Baitanaev OA, Vysotsky AN. The creation of a green zone in Astana — a breakthrough project of artificial afforestation in Kazakhstan. *Experimental biology*. 2011;(4):15–20. (In Russ.).
4. Alekseev VA. Diagnostics of the vital state of trees and stands. *Russian Journal of Forest Science*. 1989;(4):51–57. (In Russ.).
5. Ogievskiy VV, Hiron AA. *Obsledovanie i issledovanie lesnykh kul'tur* [Survey and research of forest crops]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' publ.; 1964. (In Russ.).
6. Mancino G, Ferrara A, Padula A, Nole A. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing*. 2020;12(2):291. doi: 10.3390/rs12020291
7. Broge NH, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*. 2001;76(2):156–172. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00197-8
8. Ahammad T. Effect of chlorophyll content & solar irradiance on spectral reflectance of vegetation canopies acquired by spectro-radiometer. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2021;9(1):170–178. doi: 10.30897/ijegeo.958100
9. Gitelson AA, Gritz Y, Merzlyak MN. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*. 2021;160(3):271–282. doi: 10.1078/0176-1617-00887
10. Ovchinnikov AV. Technique for experimental study of spectral brightness coefficients materials and natural backgrounds. *Journal of Radio Electronics*. 2021;(6):14. doi: 10.30898/1684-1719.2021.6.5. (In Russ.).
11. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;45:5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324
12. Hastie T, Tibshirani R, Friedman JC. Random Forests. In: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. Springer-Verlag; 2009. p.764.
13. Meng J, Li S, Wang W, Liu Q, Xie S, Ma W. Mapping forest health using spectral and textural information extracted from SPOT-5 satellite images. *Remote Sensing*. 2016;8(9):719. doi: 10.3390/rs8090719
14. Immitzer M, Atzberger C, Koukal T. Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. *Remote sensing*. 2012;4(9):2661–2693. doi: 10.3390/rs4092661
15. Plakman V, Janssen T, Brouwer N, Veraverbeke S. Mapping species at an individual-tree scale in a temperate forest, using Sentinel-2 images, airborne laser scanning data, and random forest classification. *Remote Sensing*. 2020;12(22):3710. doi: 10.3390/rs12223710

Об авторах:

Кабанов Андрей Николаевич — аспирант, старший научный сотрудник Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, 021704, Казахстан, г. Щучинск, ул. Кирова, д. 58; e-mail: 7058613132@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5479-3689, SPIN-код 9628–4453

Оспаналиев Асхат Суттибаевич — старший преподаватель Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина, 010000, Казахстан, г. Астана, ул. Женис, д. 62Б; e-mail: a.ospangaliyev@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7478-8505

Кабанова Светлана Анатольевна — кандидат биологических наук, доцент, ассоциированный профессор, заведующая отделом воспроизводства лесов и лесоразведения Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, 021704, Казахстан, г. Щучинск, ул. Кирова, д. 58; e-mail: kabanova.05@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3117-7381, SPIN-код 3897–4757

Кочегаров Игорь Сергеевич — младший научный сотрудник Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, 021704, Казахстан, г. Щучинск, ул. Кирова, д. 58; e-mail: garik_0188@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1185-5218, SPIN-код 8313–4687

Бекбаева Айгуль Мыктыбаевна — заместитель директора Центра технологической компетенции в области цифровизации АПК Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина, 010000, Казахстан, г. Астана, ул. Женис, д. 62Б; e-mail: bekbavevaigul@gmail.com

ORCID 0000–0002–3477–1888

Данченко Матвей Анатольевич — кандидат географических наук, доцент, Биологический институт Томского государственного университета, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 36; e-mail: mtd2005@sibmail.com
ORCID: 0000-0002-5974-9556, SPIN-код 8209–8687

About authors:

Kabanov Andrey Nikolaevich — PhD student, senior researcher, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, 58 Kirova st., Shchuchinsk, 021704, Kazakhstan; e-mail: 7058613132@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5479-3689, SPIN 9628–4453

Ospangaliev Askhat Suttibaevich — Senior lecturer, S. Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University, 62B Zhenis st., Astana, 010000, Kazakhstan; e-mail: a.ospangaliev@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7478-8505

Kabanova Svetlana Anatolyevna — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reforestation and Forest Cultivation, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, 58 Kirova st., Shchuchinsk, 021704, Kazakhstan; e-mail: kabanova.05@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3117-7381, SPIN 3897–4757

Kochegarov Igor Sergeevich — Junior researcher, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, 58 Kirova st., Shchuchinsk, 021704, Kazakhstan; e-mail: garik_0188@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1185-5218, SPIN 8313–4687

Bekbaeva Aigul Myktybaevna — Deputy Director, Center for technological competence in the field of digitalization of the agro-industrial complex of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62B Zhenis st., Astana, 010000, Kazakhstan; e-mail: bekbaevaigul@gmail.com
ORCID 0000-0002-3477-1888

Danchenko Matvey Anatolyevich — Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Biological Institute of Tomsk State University, 36 Lenin st., Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: mtd2005@sibmail.com
ORCID: 0000-0002-5974-9556, SPIN 8209–8687