

**А.Н. Кабанов, А.М. Бекбаева, С.А. Кабанова, И.С. Кочегаров,
М.А. Данченко, С.А. Скотт**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ
ИСКУССТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЗЕЛЕННОГО ПОЯСА Г. АСТАНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Введение. Создание зеленого пояса вокруг столицы Казахстана города Астаны близко к завершению: на 2022 год его площадь занимает более 100 тыс. га. Поскольку площадь зеленой зоны достаточно обширная, наземные наблюдения за насаждениями весьма трудоемкие и занимают много времени. В мире широко используются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с помощью которых можно выполнить множественные исследования в различных областях лесного хозяйства – почвенные, физиологические, таксационные и др. С помощью данных ДЗЗ выявляют очаги возбудителей болезней и вредителей леса [Zhang et al., 2019; Zhu et al., 2021; Garza et al., 2020; Barta et al., 2022; Zhang et al., 2023; Poblete-Echeverria et al., 2023], оценивают биомассы древостоев и их породный состав [Wan et al., 2021; Li et al., 2022; Zhang et al., 2022; Mielczarek et al., 2022; Qiao et al., 2023; Li et al., 2023], определяют влияние засухи на состояние растений [Moreno-Fernandez et al., 2022] и жизненное состояние лесов [Laze, 2022].

Для разработки дальнейшей стратегии сохранения и содержания искусственных насаждений зеленой зоны необходимо определить жизненное состояние древесных и кустарниковых растений, что стало первоочередной задачей наших исследований. Для этого проводились наземные таксационные наблюдения, использовались средства географических информационных систем (ГИС) и данные ДЗЗ.

Целью исследований являлось определение площадей ослабленных и погибающих лесных культур в зеленом поясе г. Астаны с помощью данных ДЗЗ.

Методика исследований включала закладку временных пробных площадей в лесных культурах среднего возраста с отбивкой границ участков при помощи GPS-приемника. На основании таксационных измерений и де-

тальной оценки жизнеспособности насаждений из заложенных временных пробных площадей были отобраны эталонные пробные площади (эталонные участки), наиболее объективно отражающие категории жизненного состояния лесных культур, породный состав, возраст.

На основе дешифрирования мультиспектральных снимков эталонных участков производилась идентификация породного состава и жизненного состояния искусственных насаждений всей зеленой зоны г. Астаны. Классификация жизненного состояния и породного состава насаждений основана на машинном обучении алгоритмом случайного леса (Random Forests) [Breiman, 2001].

Изучение роста и состояния лесных культур зеленой зоны г. Астаны проводилось с момента их закладки в 1997 году и продолжается по настоящее время [Kabanova et al., 2018; Кабанова и др., 2021]. Казахским научно-исследовательским институтом лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана (КазНИИЛХА) были разработаны рекомендации по содержанию лесных культур в зеленой зоне, изучено состояние интродуцированных хвойных пород, оценено содержание тяжелых металлов в ассимиляционном аппарате растений. Также КазНИИЛХА совместно с научным отделом Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Жасыл Аймак» (РГП «Жасыл Аймак») проводится научное сопровождение производственных опытов [Кабанова и др., 2019].

В результате проведения наземных исследований и обработки данных ДЗЗ выявлено, что в зеленом поясе г. Астаны основную площадь занимают лесные культуры, относящиеся к жизненному состоянию «ослабленные» – 40,3%. «Здоровые» лесные культуры занимают 31,4% площади, «погибающие» – 28,3%. Поскольку в зеленой зоне неблагоприятные почвенно-климатические условия для произрастания большинства растений, необходимо принимать лесоводственные и лесокультурные меры по улучшению условий жизни древесных и кустарниковых пород (внесение удобрений, мелиорация, рыхление почвы, реконструкция насаждений и пр.).

Материалы и методика исследования. Объектами исследований являлись лесные культуры вокруг города Астаны, произрастающие на лесопригодных, ограниченно- и условно-лесопригодных почвах. Искусственные насаждения закладывались кулисным способом, ширина кулисы 24 м, ширина межкулисного пространства – 12–24 м. Лесные культуры в кулисах создавались чистыми (*Pinus sylvestris* L. и *Betula pendula* Roth.) и смешанными насаждениями. Основной схемой смешения была 5–6 рядовая – 1 ряд кустарника, 1 ряд сопутствующей породы и 2–3 ряда главной породы, 1

ряд сопутствующей и 1 ряд кустарника, с размещением 1,0 м в ряду и 4,0 м между рядами. Кустарники и сопутствующие породы (*Malus baccata* (L.) Borkh., *Salix acutifolia* Willd. и *Populus balsamifera* L.) располагались в крайних рядах главных пород. Для исследований отбирались лесные культуры, созданные в период 2007–2010 гг., и лесные культуры 2017–2020 годов посадки.

Для наиболее полного охвата территорий зеленого пояса г. Астаны пробные площади для наземного изучения закладывались по трем направлениям: южному – Астанинское лесничество, западному – лесничество «Батыс» и северо-западному – Шортандинское лесничество.

Пробные площади закладывались в наиболее характерных местах. В смешанных культурах, произрастающих в кулисах, обследование выполнялось на всю ширину кулисы, чтобы охватить полную схему смешения, если там произрастают древесные породы (главные). В чистых культурах в обследование включались не менее 3–4 рядов главных пород. На каждой пробной площади размещалось не менее 100 живых деревьев. У всех деревьев на пробной площади измерялись высота и диаметр ствола, определялось жизненное состояние. К здоровым относились деревья без видимых признаков ослабления, механических повреждений и повреждений вредителями и болезнями, с густой кроной и хорошим охвоением (облиствением). К ослабленным относились деревья с видимыми признаками ослабления – с ажурной кроной, слабым охвоением (облиствением), отстающие в росте, с механическими повреждениями или повреждениями вредителями и болезнями. К погибающим относились деревья с видимыми признаками усыхания, с изреженной кроной, пожелтевшим ассимиляционным аппаратом. Затем по методике [Алексеев, 1989] оценивалось насаждение в целом по жизненному состоянию и относилось к различным категориям (здоровое, ослабленное и погибающее). Определялись координаты границ пробных площадей и участков с разными классами жизненного состояния. Далее указанные участки служили эталонами при дешифрировании космических снимков зеленой зоны г. Астаны. Безоблачные снимки обследованных площадей получены со спутников Planet серии SuperDoves (Flock 4s). Встроенные новейшие передовые технологии спутников Flock 4s обеспечивают улучшенное качество и четкость снимков. Кроме того, спутники получили возможность вести съемку в дополнительных полосах спектрального диапазона.

Для проведения дешифрирования территории зеленой зоны получены снимки с датировкой от 25 апреля, 18 июня, 19 июля, 28 августа и 18 сентября. Полученные снимки были объединены в единую пространственную

мозаику и единый файл по 7 спектральным каналам и 8 вегетационным индексам (NDVI, DVI, PSRI, RVI, NDRE, MNDVI, PVR, SIPI). Обучающие классы в модели были сформированы на основе искусственных насаждений следующих лесных пород: *Betula pendula* Roth., *Salix fragilis* L., *Populus balsamifera* L., *Fraxinus excelsior* L., *Ulmus pumila* L., *Acer negundo* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Ribes aureum* Pursh, *Pinus sylvestris* L. и *Malus baccata* (L.) Borkh. Приведенные лесные культуры были созданы в период 2007–2010 годов, также были сформированы обучающие классы с учетом породного состава и состояния лесных культур 2017–2020 годов посадки.

Алгоритм классификации жизненного состояния и определения породного состава насаждений основан на машинном обучении методом случайного леса (RF) [Breiman, 2001; Hastie et al., 2009; Meng et al., 2016]. Собранные наземные данные случайным образом разделялись на обучающую и контрольную выборки (для классификации и оценки точности). Главным критерием при подборе эталонных площадей была их репрезентативная представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследования. Для наилучшей идентификации лесных культур на спутниковом снимке PlanetScore площадь эталонных участков составляла на местности 50 и более м². Итого за весь вегетационный период 2022 года было обследовано 123 эталонных участка искусственных насаждений 2007–2010 годов посадки и 136 эталонных участков насаждений 2017–2020 годов посадки.

Для классификации породного состава лесных культур было создано 2590 случайно расположенных точечных координат на 259 (136+123) эталонных участках, а для классификации насаждений по категориям жизненного состояния 1230 случайно расположенных точечных координат по 123 эталонным участкам. Все данные были разделены для обучения и верификации в соотношении 50:50. Для повышения точности и эффективности разделимости классов с учетом всех возможных факторов, влияющих на пространственное распределение растительного покрова, в исследовании при составлении алгоритма классификации были использованы несколько дополнительных параметров (предикторов). Были добавлены еще 3 спектральных канала (RedEdge, Green 2, Yellow) и вегетационные индексы. Для классификации породного состава лесных культур было использовано 60 предикторов, основанных на характеристиках 5 снимков вегетационного периода. Использовались семь спектральных каналов – Blue (490 нм), Green (531 нм), Green 2 (565 нм), Red (665 нм), RedEdge (705 нм), NIR (865 нм), Yellow (610 нм) – и три вегетационных индекса (DVI, NDVI,

PSRI). Для классификации категории жизненного состояния насаждений использовались 15 предикторов, полученных на основе одного снимка (от 18 июня), с теми же семью спектральными каналами и восемью вегетационными индексами (DVI, NDVI, PSRI, RVI, NDRE, PVR, SIPI, MNDVI).

Результаты исследования. После учета сохранности, проведения таксационных измерений и детального изучения древесных растений на заложённых временных пробных площадях из общего числа были отобраны эталонные участки, наиболее объективно отражающие категорию жизненного состояния лесных культур в указанных лесничествах (табл. 1). В табл. 1 включены только те древесные породы, которые встречаются повсеместно во всех лесничествах, произрастают в идентичных почвенных условиях и имеют один класс возраста.

Основные лесообразующие породы древесных растений, такие как *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth. в условиях зеленой зоны города Астаны немногочисленны, в основном высажены солевыносливые и засухоустойчивые *Acer negundo* L. и *Ulmus pumila* L.

Таблица 1

**Таксационные показатели эталонных участков лесничеств «Батыс»,
Астанинское и Шортандинское**

**Taxation indicators of the reference areas of forestry «Batys», Astana
and Shortandinsky**

Главная порода	№ квар- тала	Средняя высота, м		Средний диаметр, см		Категория состояния насаждений
		x±m	V, %	x±m	V, %	
Лесничество «Батыс», год посадки 2010						
<i>Betula pendula</i> Roth.	67	7,5±0,4	23,9	7,8±0,4	24,6	здоровое
<i>Betula pendula</i> Roth.	67	5,5±0,3	23,6	6,5±0,5	33,9	ослабленное
<i>Betula pendula</i> Roth.	74	5,9±0,4	39,7	4,4±0,2	39,2	погибающее
<i>Acer negundo</i> L.	62	3,4±0,1	14,5	3,6±0,2	28,3	здоровое
<i>Acer negundo</i> L.	66	2,8±0,2	26,6	3,3±0,3	37,0	ослабленное
<i>Acer negundo</i> L.	66	1,9±0,1	32,8	3,1±0,2	45,2	погибающее
<i>Ulmus pumila</i> L.	62	5,6±0,25	17,2	8,1±0,5	22,7	здоровое
<i>Ulmus pumila</i> L.	63	5,0±0,34	16,7	7,5±0,6	19,1	ослабленное
<i>Ulmus pumila</i> L.	66	4,9±0,21	17,0	6,3±0,3	18,8	погибающее

Окончание табл. 1

Главная порода	№ квар- тала	Средняя высота, м		Средний диаметр, см		Категория состояния насаждений
		$\bar{x} \pm m$	V, %	$\bar{x} \pm m$	V, %	
Астанинское лесничество, год посадки 2010						
<i>Pinus sylvestris</i> L.	44	6,0±0,2	26,4	7,2±0,3	26,6	здоровое
<i>Pinus sylvestris</i> L.	44	3,2±0,2	20,4	3,9±0,2	30,1	ослабленное
<i>Betula pendula</i> Roth.	29	10,7±0,4	15,7	5,6±0,1	20,3	здоровое
<i>Betula pendula</i> Roth.	29	9,7±0,2	21,3	9,6±0,2	20,0	ослабленное
<i>Betula pendula</i> Roth.	29	7,6±0,1	34,1	4,6±0,1	26,7	погибающее
<i>Acer negundo</i> L.	53	6,7±0,2	30,7	6,4±0,2	29,4	здоровое
<i>Acer negundo</i> L.	53	3,5±0,1	25,8	4,3±0,1	24,3	ослабленное
<i>Acer negundo</i> L.	53	3,0±0,2	33,8	3,4±0,2	34,1	погибающее
<i>Ulmus pumila</i> L.	31	5,1±0,2	14,7	8,0±0,4	20,0	здоровое
<i>Ulmus pumila</i> L.	31	4,1±0,1	23,0	4,8±0,3	52,6	ослабленное
<i>Ulmus pumila</i> L.	31	3,8±0,1	43,0	4,0±0,4	49,9	погибающее
Шортандинское лесничество, год посадки 2006						
<i>Pinus sylvestris</i> L.	169	4,7±0,3	31,5	3,5±0,3	32,4	ослабленное
<i>Betula pendula</i> Roth.	141	7,2±0,2	21,8	8,9±0,3	23,5	здоровое
<i>Betula pendula</i> Roth.	141	4,5±0,2	30,9	5,7±0,3	42,7	ослабленное
<i>Betula pendula</i> Roth.	141	3,5±0,1	32,3	3,5±0,2	39,8	погибающее
<i>Acer negundo</i> L.	156	6,9±0,2	27,5	5,9±0,1	28,3	здоровое
<i>Acer negundo</i> L.	156	4,8±0,2	31,9	3,7±0,2	27,4	ослабленное
<i>Acer negundo</i> L.	156	4,0±0,2	33,4	3,1±0,1	31,7	погибающее

Примечание: $\bar{x}$ – среднее значение; m – ошибка среднего значения; V – коэффициент вариации.

Средняя высота здоровых насаждений *Betula pendula* 2010 года посадки в лесничестве «Батыс» составляла 7,5 м, что на 26,6% превышало высоту ослабленных насаждений, средняя высота которых составляла 5,5 м. В Астанинском лесничестве высота одновозрастной *Betula pendula* в здоровом насаждении была больше – 10,7 м. Несмотря на одинаковую категорию почв (условно-лесопригодные), условия произрастания в

Астанинском лесничестве лучше, и высота *Betula pendula* и *Acer negundo* значительно больше высоты данных древесных пород в лесничестве «Батыс». В Шортандинском лесничестве разница между высотой *Betula pendula* 2006 года посадки в здоровом и ослабленном насаждении составила 37,5%.

Высота насаждений *Betula pendula* колебалась на среднем и высоком уровнях вариационной изменчивости: в пределах от 32,3 до 39,7% в погибающих культурах и от 15,7 до 23,9% – в здоровых. Наибольший коэффициент вариации наблюдался в погибающем насаждении *Betula pendula*, так как в нем присутствовало совсем небольшое число ослабленных деревьев, в основном – сильно ослабленные, усыхающие, суховершинные деревья. Вариабельность по диаметру также изменялась на повышенном уровне от 20,3% в здоровом насаждении, до 39,8% – в погибающем. Средний диаметр в здоровом насаждении *Betula pendula* Roth. в лесничестве «Батыс» составлял 7,8 см, что в 1,2 раза превышало средний диаметр ослабленных (6,5 см) и в 1,7 раз – погибающих культур (4,4 см). Аналогичные результаты были получены в лесных культурах остальных изученных древесных пород. Можно констатировать, что таксационные показатели изученных древесных пород в здоровом насаждении были значительно больше, чем у деревьев в ослабленном или погибающем насаждении.

Классификация породного состава лесных культур была проведена алгоритмом машинного обучения с применением метода опорных векторов (SVM – support vector machine), индекс Каппы Коэна составил 0,76 балла с точностью 87%. При рассмотрении результатов дешифрирования территории зеленой зоны г. Астаны было установлено, что на большей части лесничеств искусственные насаждения находятся в ослабленном и погибающем состоянии, но при наземном исследовании было выявлено, что распознанные как погибающие и ослабленные культуры представлены посадками, созданными в 2018–2020 гг., эталонные участки которых также были добавлены для классификации.

На рис. 1 представлены результаты классификации фрагмента спутникового снимка PlanetScope.

На рис. 2 представлено распределение площади, занимаемой древесными породами зеленой зоны г. Астаны, полученное по результатам классификации спутникового снимка PlanetScope. Согласно классификации можно отметить, что преобладающими породами зеленой зоны являются *Ulmus pumila* L., *Acer negundo* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Betula pendula* Roth.

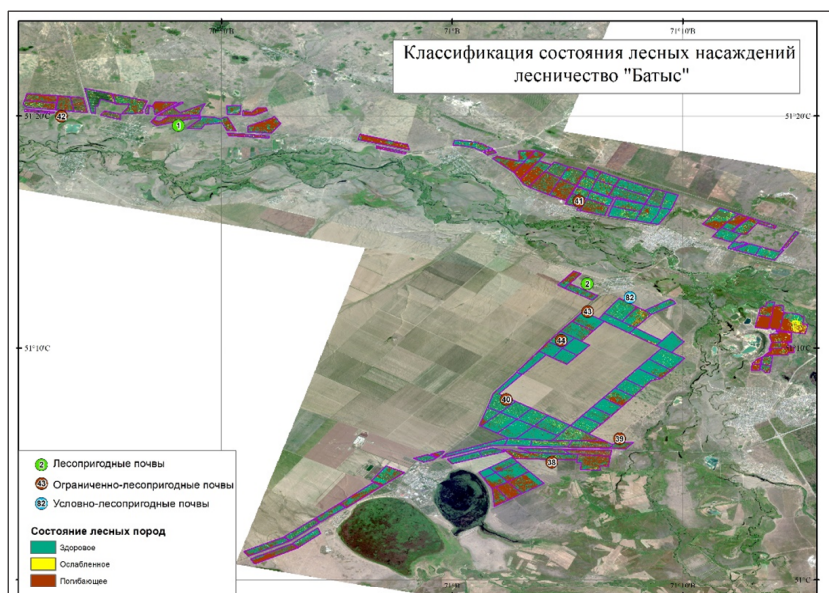


Рис. 1. Результаты классификации спутникового снимка PlanetScope по категориям жизненного состояния лесных культур и категориям лесопригодности почв (лесничество Батыс)

Fig. 1. Results of the PlanetScope satellite image classification by categories of the vital state of forest crops and categories of forest suitability of soils (Batys Forestry)

Следует отметить, что культуры *Elaeagnus angustifolia* L. на всей территории зеленого пояса в текущем году подверглись влиянию неблагоприятных почвенно-климатических условий и повреждению вредителями, в связи с чем основная часть насаждений находится в ослабленном и погибающем состоянии – 38,3 и 30,9%, соответственно, в здоровом жизненном состоянии находится 30,8% культур (табл. 2). При рассмотрении данных классификации жизненного состояния лесных культур зеленой зоны можно отметить, что у следующих древесных и кустарниковых пород: *Betula pendula* Roth., *Ulmus pumila* L., *Acer negundo* L., *Caragana arborescens* Lam., *Malus baccata* L., *Fraxinus excelsior* L., *Salix acutifolia* Willd – здоровых насаждений наблюдается больше.

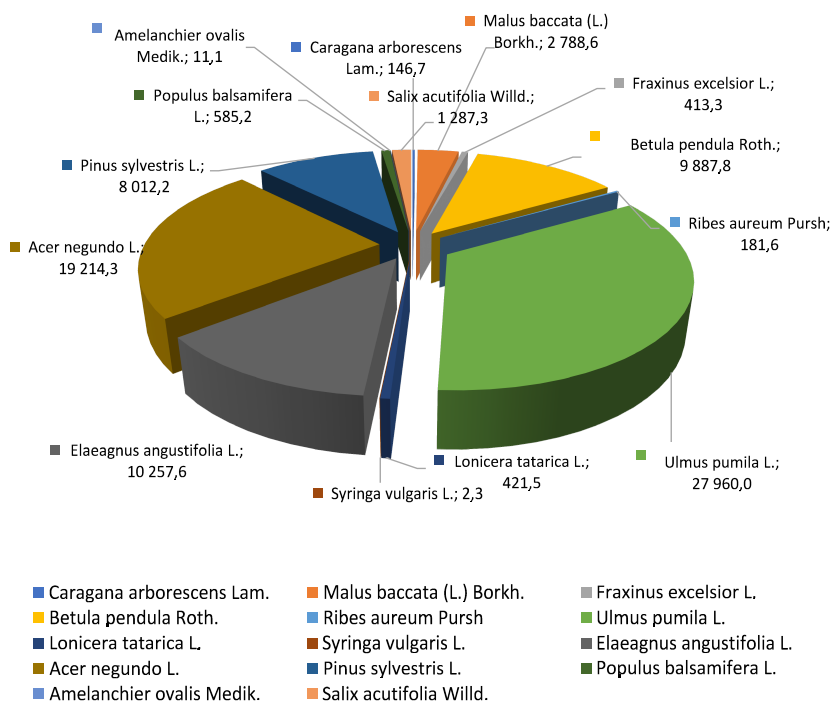


Рис. 2. Площади лесных культур древесных и кустарниковых пород зеленой зоны г. Астаны, га

Fig. 2. Areas of forest crops of tree and shrub species of the green zone of Astana, ha

Интересен тот факт, что *Acer negundo* L. считается породой, быстро приспосабливающейся к любым условиям и вследствие этого широко распространенной по многим регионам и странам. В зеленом поясе г. Астаны у *Acer negundo* L. не наблюдается большой приспособительной способности к местным почвенно-климатическим условиям. Зачастую кленовые насаждения ослаблены и достаточно большие площади его относятся к категории «погибающие».

По данным лесостроительного проекта РГП «Жасыл Аймак» по состоянию на 2021 год общая площадь создаваемых искусственных насаждений зеленой зоны города Астаны составляет 100 977,5 га. Из данных табл. 2 видно, что площадь зеленой зоны, занимаемая лесными культурами на данный момент, составляет 81 169,31 га, из них на долю «здоровых» насажде-

ний приходится 25 733,61 га, «ослабленных» – 31 358,00 га и «погибающих» – 24077,70 га. Оставшиеся 19 808,19 га составляют списанные из-за низкой приживаемости или полностью погибшие участки лесных культур, планируемые к проведению лесовосстановительных мероприятий.

Таблица 2

Классификация лесных культур по жизненному состоянию**Classification of forest crops by vital condition**

Порода	Площадь по жизненному состоянию, га			Всего, га	Жизненное состояние в % от площади		
	здоровые	ослабленные	погибающие		здоровые	ослабленные	погибающие
<i>Ulmus pumila</i> L.	8816,44	10756,27	8387,26	27959,97	31,5	38,4	30,1
<i>Acer negundo</i> L.	5971,19	7460,19	5782,87	19214,25	31,0	38,9	30,1
<i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	3167,77	3916,97	3172,89	10257,63	30,8	38,3	30,9
<i>Betula pendula</i> Roth.	3459,18	3842,15	2586,43	9887,76	34,9	38,8	26,3
<i>Pinus sylvestris</i> L.	2613,70	3116,93	2281,55	8012,18	32,6	38,9	28,5
<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.	833,95	1119,21	835,41	2788,57	29,9	40,1	30,0
<i>Salix acutifolia</i> Willd.	290,46	417,07	579,76	1287,29	22,5	32,4	45,1
<i>Populus balsamifera</i> L.	203,74	225,95	155,47	585,16	34,8	38,6	26,6
<i>Lonicera tatarica</i> L.	123,96	175,11	122,40	421,47	29,4	41,5	29,1
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	117,16	187,61	108,57	413,34	28,3	45,4	26,3
<i>Ribes aureum</i> Pursh	72,28	76,34	33,02	181,64	39,7	42,0	18,3
<i>Caragana arborescens</i> Lam.	61,10	59,23	26,34	146,67	41,6	40,5	17,9
<i>Amelanchier ovalis</i> Medik.	1,85	3,68	5,59	11,12	16,6	33,1	50,3
<i>Syringa vulgaris</i> L.	0,83	1,29	0,14	2,26	36,7	57,1	6,2
Итого, га:	25733,61	31358,00	24077,70	81169,31			
Итого, % от площади (S)					31,4	40,3	28,3

Заключение. В результате проведения наземных исследований и обработки данных ДЗЗ выявлено, что в зеленом поясе г. Астаны основную площадь занимают лесные культуры, относящиеся к жизненному состоянию «ослабленные» – 40,3%. «Здоровые» лесные культуры занимают 31,4% площади, «погибающие» – 28,3%. Наиболее распространенными породами являются *Ulmus pumila* L. (34,4%), *Acer negundo* L. (23,7%), *Betula pendula* Roth. и *Elaeagnus angustifolia* L. (более 12%). У следующих древесных и кустарниковых пород: *Betula pendula* Roth., *Ulmus pumila* L., *Acer negundo* L., *Caragana arborescens* Lam., *Malus baccata* (L.) Borkh., *Fraxinus excelsior* L., *Salix acutifolia* Willd – площадь здоровых насаждений незначительно больше, чем ослабленных. В то же время у трех основных пород – *Ulmus pumila* L., *Acer negundo* L., *Betula pendula* Roth. – площадь здоровых и ослабленных насаждений примерно одинакова, а площадь погибающих насаждений находится в пределах 26,3–30,1%.

Учитывая тот факт, что в районе г. Астаны неблагоприятные почвенно-климатические условия для произрастания большинства растений, необходимо принимать лесоводственные и лесокультурные меры по улучшению условий жизни древесных и кустарниковых пород (внесение удобрений, рыхление почвы и пр.), особенно в лесных культурах в фазе приживания. В культурах старшего возраста нужно проводить реконструкцию погибших насаждений, меняя ранее произраставшую и погибшую в настоящее время породу на другую, более устойчивую к засолению почвы.

Сведения о финансировании исследования. Данное исследование финансируется Министерством экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан (№. BR10263776)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Кабанова С.А., Данченко М.А., Скотт С.А., Кабанов А.Н., Цветкова Н.В., Кириллов В.Ю. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султан // Лесотехнический журнал. 2021. № 4 (44). С. 57–67.

Кабанова С.А., Кабанов А.Н., Хасенов А.А., Данченко М.А. Научное сопровождение производственных опытов в лесных культурах зеленого пояса г. Нур-Султан // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2019. № 4. С. 437–452.

Barta V., Hanus J., Dobrovolný L., Homolova L. Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees // *Forest Ecology and Management*. 2022. 506. P. 119984. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119984.

Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. 45(1). P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Garza BN., Ancona V., Enciso J., Perotto-Baldivieso HL., Kunta M., Simpson C. Quantifying Citrus Tree Health Using True Color UAV Images // *Remote Sensing*. 2020. 12(1). P. 170. DOI: 10.3390/rs12010170

Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Random Forests. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer-Verlag, 2009. P. 764.

Kabanova S.A., Zenkova Z.N., Danchenko M.A. Regional risks of artificial for-estation in the steppe zone of Kazakhstan (case study of the green belt of Astana) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. P. 211. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012055

Laze K. Preliminary findings on remote sensing of forest cover change, forest and tree health in Southeastern Europe // *ISPRS – International Archives of the Photo-grammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. XLIII-B4-2022. P. 133–139. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-133-2022.

Li X., Zheng Z., Xu C., Zhao P., Chen J., Wu J., Zhao X., Mu X., Zhao D., Zeng Y. Individual tree-based forest species diversity estimation by classification and cluster-ing methods using UAV data // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2023. 11. DOI: 10.3389/fevo.2023.1139458.

Li Z., Yang R., Cai W., Xue Y., Hu Y., Li L. LLAM-MDC Net for Detecting Re-mote Sensing Images of Dead Tree Clusters // *Remote Sensing*. 2022. 14. P. 3684. DOI: 10.3390/rs14153684.

Meng J., Li S., Wang W., Liu Q., Xie S., Ma, W. Mapping forest health using spec-tral and textural information extracted from spot-5 satellite images // *Remote Sensing*. 2016. 8(9). P. 719.

Mielczarek D., Sikorski P., Archiciński P., Ciężkowski W., Zaniewska E., Chor-manski J. The Use of an Airborne Laser Scanner for Rapid Identification of Invasive Tree Species *Acer negundo* in Riparian Forests // *Remote Sensing*. 2022. 15. P. 212. DOI: 10.3390/rs15010212.

Moreno-Fernandez D., Camarero J., Garcia M., Lines E., Sanchez-Davila J., Ti-jerin-Trivino J., Valeriano C., Viana-Soto A., Zavala M., Ruiz-Benito P. The Interplay of the Tree and Stand-Level Processes Mediate Drought-Induced Forest Dieback: Evi-dence from Complementary Remote Sensing and Tree-Ring Approaches // *Ecosys-tems*. 2022. 25. P. 1–16. DOI: 10.1007/s10021-022-00793-2.

Qiao Y., Zheng G., Du Z., Ma X., Li J., & Moskal L. Tree-Species Classification and Individual-Tree-Biomass Model Construction Based on Hyperspectral and LiDAR Data // *Remote Sensing*. 2023. 15. P. 1341. DOI: 10.3390/rs15051341.

Poblete-Echeverria C., Duncan S.J., McLeod A. Detection of the spectral signature of Phytophthora root rot (PRR) symptoms using hyperspectral imaging // *Acta Hortic.* 2023. 1360. P. 77–84. DOI: 10.17660/ActaHortic.2023.1360.10

Wan H., Tan, Y., Jing L., Li H., Qiu F., Wu W. Tree Species Classification of Forest Stands Using Multisource Remote Sensing Data // *Remote Sensing.* 2021. 13. P. 144. DOI: 10.3390/rs13010144.

Zhang S., Qin J., Tang X., Wang Y., Huang J., Song Q., Min J. Spectral Characteristics and Evaluation Model of *Pinus massoniana* Suffering from Bursaphelenchus Xylophilus Disease // *Spectroscopy and Spectral Analysis.* 2019. 39. P. 865–872. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0865-08.

Zhang Z., Liu X., Zhu L., Li J., Zhang Y. Remote Sensing Extraction Method of *Illicium verum* Based on Functional Characteristics of Vegetation Canopy // *Remote Sensing.* 2022. 14. P. 6248. DOI: 10.3390/rs14246248.

Zhang Z., Jiang D., Chang Q., Zheng Z., Fu X., Li K., Mo H. Estimation of Anthocyanins in Leaves of Trees with Apple Mosaic Disease Based on Hyperspectral Data // *Remote Sensing.* 2023. 15(7). P. 1732. DOI: 10.3390/rs15071732.

Zhu J., Xu Q., Yao J., Zhang X., Xu C. The Changes of Leaf Reflectance Spectrum and Leaf Functional Traits of *Osmanthus fragrans* Are Related to the Parasitism of *Cuscuta japonica* // *Applied Sciences.* 2021. 11(4). P. 1937. DOI: 10.3390/app11041937

References

Alekseev V.A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev i drevostoev. *Lesovedenie.* 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.)

Kabanova S.A., Danchenko M.A., Skott S.A., Kabanov A.N., Cvetkova N.V., Kirillov V.Yu. Sravnitelnyj analiz nakopleniya tyazhelyh metallov v hvoe introductentov v zelenoj zone g. Nur-Sultan. *Lesotekhnicheskij zhurnal.* 2021, no 4 (44), pp. 57–67. (In Russ.)

Kabanova S.A., Kabanov A.N., Hasenov A.A., Danchenko M.A. Nauchnoe soprovozhdenie proizvodstvennyh opytov v lesnyh kulturah zelenogo poyasa g. Nur-Sultan. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo,* 2019, no 4, pp. 437–452. (In Russ.)

Barta V., Hanus J., Dobrovolný L., Homolova L. Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees. *Forest Ecology and Management,* 2022, 506, p. 119984. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119984.

Breiman L. Random Forests. *Machine Learning,* 2001, 45(1), pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Garza B.N., Ancona V., Enciso J., Perotto-Baldivieso H.L., Kunta M., Simpson C. Quantifying Citrus Tree Health Using True Color UAV Images. *Remote Sensing,* 2020, 12(1), p.170. DOI: 10.3390/rs12010170

Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Random Forests. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer-Verlag, 2009, p. 764.

Kabanova S.A., Zenkova Z.N., Danchenko M.A. Regional risks of artificial forestation in the steppe zone of Kazakhstan (case study of the green belt of Astana). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, p. 211. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012055

Laze K. Preliminary findings on remote sensing of forest cover change, forest and tree health in Southeastern Europe. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, XLIII-B4-2022, pp. 133–139. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-133-2022.

Li X., Zheng Z., Xu C., Zhao P., Chen J., Wu J., Zhao X., Mu X., Zhao D., Zeng Y. Individual tree-based forest species diversity estimation by classification and clustering methods using UAV data. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11. DOI: 10.3389/fevo.2023.1139458.

Li Z., Yang R., Cai W., Xue Y., Hu Y., Li L. LLAM-MDC Net for Detecting Remote Sensing Images of Dead Tree Clusters. *Remote Sensing*, 2022, 14, p. 3684. DOI: 10.3390/rs14153684.

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), p. 719.

Mielczarek D., Sikorski P., Archiciński P., Ciężkowski W., Zaniewska E., Chormanski J. The Use of an Airborne Laser Scanner for Rapid Identification of Invasive Tree Species *Acer negundo* in Riparian Forests. *Remote Sensing*, 2022, 15, p. 212. DOI: 10.3390/rs15010212.

Moreno-Fernandez D., Camarero J., Garcia M., Lines E., Sanchez-Davila J., Tijerin-Trivino J., Valeriano C., Viana-Soto A., Zavala M., Ruiz-Benito P. The Interplay of the Tree and Stand-Level Processes Mediate Drought-Induced Forest Dieback: Evidence from Complementary Remote Sensing and Tree-Ring Approaches. *Ecosystems*, 2022, 25, pp. 1–16. DOI: 10.1007/s10021-022-00793-2.

Qiao Y., Zheng G., Du Z., Ma X., Li J., & Moskal L. Tree-Species Classification and Individual-Tree-Biomass Model Construction Based on Hyperspectral and LiDAR Data. *Remote Sensing*, 2023, 15, p. 1341. DOI: 10.3390/rs15051341.

Poblete-Echeverria C., Duncan S.J., McLeod A. Detection of the spectral signature of Phytophthora root rot (PRR) symptoms using hyperspectral imaging. *Acta Horti*, 2023, 1360, pp. 77–84. DOI: 10.17660/ActaHortic.2023.1360.10

Wan H., Tan, Y., Jing L., Li H., Qiu F., Wu W. Tree Species Classification of Forest Stands Using Multisource Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 2021, 13, p. 144. DOI: 10.3390/rs13010144.

Zhang S., Qin J., Tang X., Wang Y., Huang J., Song Q., Min J. Spectral Characteristics and Evaluation Model of *Pinus massoniana* Suffering from Bursaphelenchus Xylophilus Disease. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39, pp. 865–872. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0865-08.

Zhang Z., Liu X., Zhu L., Li J., Zhang Y. Remote Sensing Extraction Method of *Illicium verum* Based on Functional Characteristics of Vegetation Canopy. *Remote Sensing*, 2022, 14, p. 6248. DOI: 10.3390/rs14246248.

Zhang Z., Jiang D., Chang Q., Zheng Z., Fu X., Li K., Mo H. Estimation of Anthocyanins in Leaves of Trees with Apple Mosaic Disease Based on Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, 2023, 15(7), p. 1732. DOI: 10.3390/rs15071732.

Zhu J., Xu Q., Yao J., Zhang X., Xu C. The Changes of Leaf Reflectance Spectrum and Leaf Functional Traits of *Osmanthus fragrans* Are Related to the Parasitism of *Cuscuta japonica*. *Applied Sciences*, 2021, 11(4), p. 1937. DOI: 10.3390/app11041937

Материал поступил в редакцию 10.05.2023

Кабанов А.Н., Бекбаева А.М., Кабанова С.А., Кочегаров И.С., Данченко М.А., Скотт С.А. Определение состояния искусственных насаждений зеленого пояса г. Астаны с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 247. С. 137–153. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.137-153

Для определения дальнейшей стратегии сохранения и содержания искусственных насаждений зеленого пояса г. Астаны было необходимо оценить жизненное состояние древесных и кустарниковых растений, что стало первоочередной задачей наших исследований. Для этого проводились наземные таксационные наблюдения, использовались мультиспектральные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и инструменты GIS. Целью исследований являлось определение площадей ослабленных и погибающих лесных культур в зеленом поясе г. Астаны с помощью данных ДЗЗ. Методика исследований заключалась в закладке эталонных участков в лесных культурах различного породного состава и возраста, в которых проводилось таксация деревьев и определение их жизненного состояния. На основе дешифрирования мультиспектральных снимков эталонных участков производилась идентификация породного состава и жизненного состояния искусственных насаждений всей зеленой зоны г. Астаны. В результате проведения наземных исследований и обработки данных ДЗЗ выявлено, что в зеленом поясе г. Астаны основную площадь занимают лесные культуры, относящиеся к жизненному состоянию «ослабленные» – 40,3%. «Здоровые» лесные культуры занимают 31,4% площади, «погибающие» – 28,3%.

Ключевые слова: жизненное состояние, вегетационные индексы, зеленый пояс, ДЗЗ, почва.

Kabanov A.N., Bekbaeva A.M., Kabanova S.A., Kochegarov I.S., Danchenko M.A., Skott S.A. Determination of the state of artificial plantings of the green belt of Astana using remote sensing data of the earth. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 247, pp. 137–153 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.137-153

To determine the further strategy of conservation and maintenance of artificial plantings of the green belt of Astana, it was necessary to assess the vital condition of woody and shrubby plants, which became the primary task of our research. For this purpose, ground-based taxational observations were carried out, multispectral data of remote sensing of the Earth (remote sensing) and GIS tools were used. The purpose of the research was to determine the areas of weakened and dying forest crops in the green belt of Astana using remote sensing data. The research methodology consisted in laying reference plots in forest crops of various species composition and age, in which trees were taxed and their vital condition was determined. Based on the decoding of multispectral images of reference sites, the identification of the rock composition and the living condition of artificial plantings of the entire green zone of Astana was carried out. As a result of ground-based research and remote sensing data processing, it was revealed that in the green belt of Astana, the main area is occupied by forest crops related to the «weakened» state of life – 40.3%. «Healthy» forest crops occupy 31.5% of the area, «dying» – 28.3%.

Key words: vital condition, vegetation indices, green belt, remote sensing, soil.

КАБАНОВ Андрей Николаевич – старший научный сотрудник Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, аспирант НИ ТГУ. SPIN-код: 9628-4453. ORCID: 0000-0002-3199-543X.

021704, ул. Кирова, д. 58, г. Щучинск, Казахстан. E-mail: 7058613132@mail.ru

KABANOV Andrey N. – senior researcher A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, postgraduate student of the Biological Institute, National Research Tomsk State University. SPIN: 9628-4453. ORCID: 0000-0002-3199-543X.

021704. Kirov str. 58. Shchuchinsk. Republic of Kazakhstan. E-mail: 7058613132@mail.ru

БЕКБАЕВА Айгуль Мыктыбаевна – заместитель директора Центра технологической компетенции в области цифровизации АПК КАТУ им. С. Сейфуллина, магистр наук. ORCID 0000-0002-3477-1888.

010000, пр. Женис, д. 62Б, г. Нур-Султан, Казахстан. E-mail: bekbaevaigul@gmail.com

BEKBAEVA Aigul M. – Deputy Director of the Center for Technological Competence in the Field of Digitalization of Agriculture, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Master of Science. ORCID 0000-0002-3477-1888.

010000. Zhenis av. 62B. Nursultan. Kazakhstan. E-mail: bekbaevaigul@gmail.com

КАБАНОВА Светлана Анатольевна – заведующая отделом воспроизводства лесов и лесоразведения Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, кандидат биологических наук, доцент, ассоциированный профессор. SPIN-код: 3897-4757. ORCID: 0000-0002-3117-7381.

021704, ул. Кирова, д. 58, г. Щучинск, Казахстан. E-mail: kabanova.05@mail.ru

KABANOVA Svetlana A. – PhD (Biological), Associate Professor, Head of the Department of Reforestation and Afforestation, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry. SPIN: 3897-4757. ORCID: 0000-0002-3117-7381.

021704. Kirov str. 58. Shchuchinsk. Republic of Kazakhstan. E-mail: kabanova.05@mail.ru

КОЧЕГАРОВ Игорь Сергеевич – младший научный сотрудник Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана, магистр наук. SPIN-код: 8313-4687. ORCID: 0000-0003-1185-5218.

021704, ул. Кирова, д. 58, г. Щучинск, Казахстан. E-mail: garik_0188@mail.ru

KOCHEGAROV Igor S. – junior researcher A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, master of science. SPIN: 8313-4687. ORCID: 0000-0003-1185-5218.

021704. Kirov str. 58. Shchuchinsk. Republic of Kazakhstan. E-mail: garik_0188@mail.ru

ДАНЧЕНКО Матвей Анатольевич – доцент Биологического института Томского государственного университета, кандидат географических наук. SPIN-код: 8209-8687. ORCID: 0000-0002-5974-9556.

634050, пр. Ленина, д. 36, г. Томск, Россия. E-mail: mtd2005@sibmail.com

DANCHENKO Matvey A. – PhD (Geographical), Associate Professor of the National Research Tomsk State University. SPIN: 8209-8687. ORCID: 0000-0002-5974-9556.

634050. Lenin str. 36. Tomsk. Russia. E-mail: mtd2005@sibmail.com

СКОТТ Сабина Артуровна – сотрудник кафедры микробиологических наук государственного колледжа Колумбуса. ORCID: 0000-0002-2029-8938.

43015, Спринг-стрит, д. 550 Е, штат Огайо, Колумбус, США. E-mail: sabina.a.scott@gmail.com

SCOTT Sabina A. – adjunct of microbiological sciences, Columbus State Community College. ORCID: 0000-0002-2029-8938.

43015. Sptring str. 550 E. Columbus city. Ohio State. USA. E-mail: sabina.a.scott@gmail.com