

СТАТЬИ

УДК 91:528.88

DOI 10.17513/use.38109

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА
ПОЙМЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ПО ГЛОБАЛЬНЫМ
ДАНЫМ О ТИПАХ ЗЕМНОГО ПОКРОВА****Берденгалиева А.Н.**

*ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук», Волгоград,
e-mail: berdengalieva-an@vfanc.ru*

В работе исследуются возможности применения технологий дистанционного зондирования Земли для картографирования пойменных лесов в Волго-Ахтубинской пойме. Пойменные леса играют важную роль в поддержании экосистемного баланса и обеспечении жизненного пространства для многих растений и животных, включая редкие и уязвимые виды. Однако они подвержены угрозам, таким как гидрологические и климатические изменения, которые приводят к деградации и потере лесов. Проведен сравнительный анализ различных информационных продуктов, основанных на спутниковых данных высокого пространственного разрешения, таких как FROM-GLC10, ESRI Land Cover, ESA WorldCover и Global Forest Change. Основными типами земного покрова, выделенными по данным высокого пространственного разрешения, являются пашни, леса, травянистые экосистемы, кустарники, водоемы, искусственные поверхности, открытые почвы, вечные льды и снега. Некоторые информационные продукты также выделяют водно-болотные угодья, включая мангры. Глобальные данные о типах земного покрова обладают преимуществами, такими как общеземной охват, свободный доступ и высокое пространственное разрешение. Однако существуют недостатки, включающие ограниченное количество классов, ограниченность глубины архива, нерегулярное обновление и различия в точности у разных источников данных. Для повышения точности исходных данных был составлен результирующий растр, объединяющий все указанные информационные продукты, что позволило выделить лесные пиксели, идентифицированные как минимум двумя источниками. Полученная площадь лесов в 34,3 тыс. га достаточно точно согласуется с результатами экспертного дешифрирования по данным сверхвысокого пространственного разрешения. Наибольшей точностью характеризуются данные FROM-GLC10 ($R^2 = 0,82$, $RMSE = 3,94\%$). При регулярном обновлении исходных информационных продуктов типов земного покрова станет возможным постоянный мониторинг площади лесных насаждений, что даст возможность определить ключевые факторы динамики их состояния.

Ключевые слова: Волго-Ахтубинская пойма, Волгоградская область, лесные насаждения, геоинформационное картографирование, геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли

Работа выполнена по теме Государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100311-3.

**MAPPING OF FORESTS IN THE VOLGA-AKHTUBA
FLOODPLAIN USING GLOBAL LAND COVER DATA****Berdengalieva A.N.**

*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, e-mail: berdengalieva-an@vfanc.ru*

The paper discusses the application of remote sensing technologies for mapping riparian forests in the Volga-Ahtuba floodplain. Riparian forests play a crucial role in maintaining ecosystem balance and providing habitat for numerous plant and animal species, including rare and vulnerable ones. However, they are exposed to threats such as hydrological and climatic changes, leading to forest degradation and loss. A comparative analysis of different high-resolution satellite-based information products was conducted, including FROM-GLC10, ESRI Land Cover, ESA WorldCover, and Global Forest Change. The main land cover types identified based on high spatial resolution data include croplands, forests, grassland ecosystems, shrubs, water bodies, artificial surfaces, bare soil, permanent ice and snow. Some information products also delineate wetland areas, including mangroves. Global land cover data have advantages such as global coverage, open accessibility, and high spatial resolution. However, there are limitations, including a limited number of classes, limited depth of archive, irregular updating, and differences in accuracy among different data sources. To improve the accuracy of the input data, a resulting raster was created by combining all the mentioned information products, allowing for the identification of forest pixels confirmed by at least two sources. The resulting forest area of 34.3 thousand hectares is in good agreement with the results of expert interpretation using very high spatial resolution data. The FROM-GLC10 data demonstrate the highest accuracy ($R^2 = 0.82$, $RMSE = 3.94\%$). With regular updating of the input land cover information products, continuous monitoring of forested areas will become possible, enabling the identification of key factors influencing their dynamics. This will provide valuable insights into the state of riparian forests and aid in their management and conservation efforts.

Keywords: Volga-Akhtuba floodplain, Volgograd region, forest plantations, geoinformation mapping, geoinformation systems, remote sensing of the Earth

The work was carried out on the topic of the State assignment of the Federal Scientific Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences No. 122020100311-3.

Волго-Ахтубинская пойма является значимым природным комплексом, в котором леса играют важную роль [1]. Пойменные леса являются жизненным пространством для множества растений и животных. Они предоставляют укрытие, пищу и места гнездования для многих видов, включая редкие и уязвимые. Биологическое разнообразие пойменных лесов способствует поддержанию экосистемного баланса и предоставляет ценные экологические услуги [2]. Однако пойменные леса также подвержены угрозам, особенно в контексте гидрологических и климатических изменений. Снижение частоты и уровней половодья приводит к стабилизации грунтовых вод, накоплению солей в зоне аэрации, что приводит к деградации аборигенных растительных сообществ. Особенно губительны эти изменения для дубрав и ивняков, которые замещаются инвазивными видами [3]. Изменения климата, такие как повышение температуры и засухи, могут снизить устойчивость лесов и способствовать распространению пожаров и вредителей. Это может привести к деградации и потере пойменных лесов, что имеет негативные последствия для биоразнообразия.

Для сохранения и защиты пойменных лесов в Волго-Ахтубинской пойме необходимо проводить научные исследования по оценке их актуального состояния, разрабатывать эффективные стратегии управления и принимать меры по адаптации к гидрологическим и климатическим изменениям. Важно осознавать ценность и уникальность пойменных лесов и принимать меры для их сохранения для экологической устойчивости региона. Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса широко применяются для картографирования лесных насаждений [4, 5], тем не менее даже в пределах Волгоградской области методы спутникового мониторинга пойменных лесов недостаточно проработаны. Имеющиеся исследования чаще основаны на очень трудоемком экспертном дешифрировании данных сверхвысокого пространственного разрешения [6–8], которые обновляются достаточно редко в рамках общедоступных сервисов либо имеют высокую стоимость.

Наличие доступных электронных карт типов земного покрова, полученных по спутниковым данным высокого пространственного разрешения, открывает возможность картографирования различных категорий земель на региональном и муниципальном уровнях. Первым информаци-

онным продуктом типов земного покрова разрешения 10 м/пикс. стал FROM-GLC10, изначально основанный на спутниковых снимках Landsat разрешения 30 м/пикс. Появление миссии Sentinel-2 позволило получить данные пространственного разрешения 10 м/пикс., что сделало возможным улучшение пространственного разрешения данных FROM-GLC10 до 10 м/пикс. [9]. Данные ESRI Land Cover, основанные на спутниковых изображениях Sentinel-2, имеют временной охват 2017–2022 гг. [10], что открывает возможности для анализа изменений в землепользовании на этом отрезке времени. Данные ESA WorldCover доступны только на 2020 г., но основаны как на оптических спутниковых изображениях Sentinel-2, так и на радиолокационных данных Sentinel-1 [11], что повышает их точность при картографировании защитных лесных насаждений. Также существует еще один глобальный информационный продукт разрешения 30 м/пикс. – Global Land Cover 30 (GLC30), но он показал значительно меньшую точность при картографировании лесных насаждений, а леса на пойменных землях по этим данным относятся к водноболотным угодьям без выделения древостоев [12]. По этим причинам в данной работе GLC30 не рассматривается.

Основные типы земного покрова, которые выделяются по данным высокого пространственного разрешения: пашни, леса, травянистые экосистемы (grassland), кустарники, водоемы, искусственные поверхности (застройка), открытые почвы, вечные льды и снега. Также некоторые информационные продукты выделяют водно-болотные угодья, в том числе мангры. Достоинствами указанных глобальных данных о типах земного покрова являются их общеземной охват, свободный доступ, высокое пространственное разрешение. К недостаткам этих данных можно отнести относительно небольшое количество классов (8–10), ограниченность глубины архива (1–5 лет), нерегулярное обновление, существенные различия в точности у разных источников данных при картографировании разных типов земного покрова.

Кроме информационных продуктов типов земного покрова для картографирования лесов используются специализированные данные. Одним из наиболее распространенных источников является Global Forest Change (GFC) пространственного разрешения 30 м/пикс. [13]. Достоинством этого информационного продукта является

большая глубина архива: данные о лесопокрытой площади на 2000 г. с учетом ее изменений за 2001–2022 гг.

Цель данного исследования – провести сравнительный анализ результатов картографирования лесов в пойменных ландшафтах Нижней Волги в пределах Волгоградской области по данным глобальных информационных продуктов Global Forest Change, FROM-GLC10, ESRI, ESA. Для достижения цели решались следующие задачи: разработка карт лесов по данным разных информационных продуктов, создание результирующего растра по данным всех источников, сопоставление лесистости в разрезе муниципальных образований с определением точности на основе коэффициента детерминации, относительной и среднеквадратической ошибок.

Материалы и методы исследования

Исследование проводится в северной части Волго-Ахтубинской поймы в границах Волгоградской области (рис. 1). Площадь исследуемой территории составляет 185,23 тыс. га. В работе кроме данных о типах земного покрова ESA, ESRI, FROM-GLC10 были использованы данные Global

Forest Change – 2022. Продукт основан на автоматическом распознавании лесов по мультиспектральным снимкам Landsat в видимом и инфракрасном диапазонах спектра и имеет пространственное разрешение 30 м. GFC-2022 – это набор данных, который разделен на тайлы размером 10x10 градусов в географической проекции в трех растровых слоях: «treecover2000» – слой леса, «loss» – потеря и «gain» – прирост. Древесный покров на 2000 г. определялся как закрытие полога для всей растительности высотой более 5 м. В слое «treecover2000» от 1 до 100 указывается процент древесного покрова в пикселе. За покрытую лесом площадь принимались пиксели GFC с проективным покрытием 30 и более процентов, вычитались пиксели исчезнувшего в 2000–2022 гг. леса, добавлялись пиксели восстановившихся насаждений.

Все данные предоставляются в формате GeoTIFF и общеземной географической системе координат, только данные ESRI спроецированы в универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM). Это позволяет свободно использовать данные с использованием популярных геоинформационных программ, например QGIS.

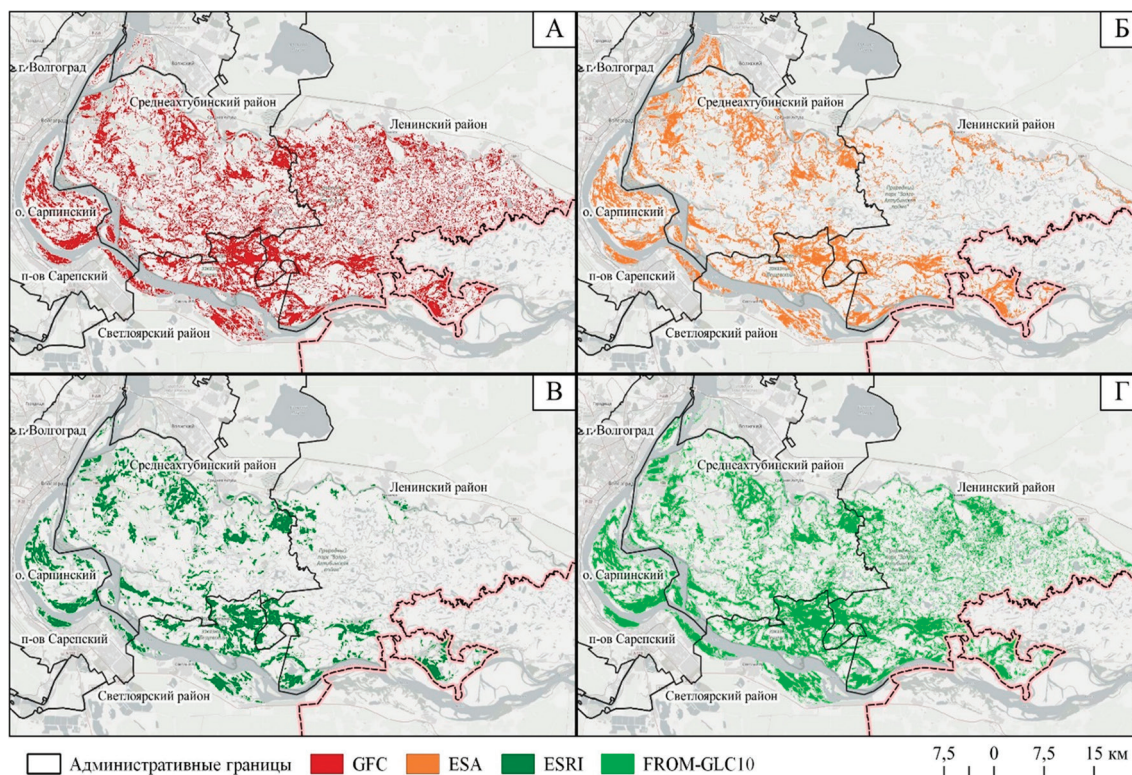


Рис. 1. Лесной покров по данным разных информационных продуктов (а – GFC, б – ESA, в – ESRI, г – FROM-GLC10)

Типы земного покрова по данным различных информационных продуктов в растровых файлах закодированы различными цифровыми значениями: у ESRI Land Cover пиксели леса имеют значение 2, у ESA World Cover лес обозначен значением 10, а FROM-GLC10 – 20. Поэтому были созданы бинарные маски лесного покрова согласно каждому источнику данных, где лесным пикселям присваивалось значение 1, а всем остальным – 0.

Поскольку каждый информационный продукт характеризуется различными ошибками, как пропусками, так и ложными определениями лесов [12], был разработан результирующий растровый слой, пиксели которого содержали количество информационных продуктов, относивших данный пиксель к лесопокрытой площади. За достоверные пиксели леса в этом случае принимались пиксели по данным двух и более информационных продуктов. После чего было проведено сравнение площадей леса по данным отдельных продуктов и результирующего растра в разрезе муниципальных образований, что позволило оценить точность картографирования леса на основе разных источников сведений о типах земного покрова. Для сравнительного анализа использовался показатель лесистости – отношение площади леса к общей площади территории, т.е. доля лесных насаждений в общей площади исследования. Статистическая обработка выполнена в Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате сравнения на территории Волго-Ахтубинской поймы общая площадь лесного покрова составляет от 19,9 тыс. га по данным ESRI до 41,1 тыс. га по данным GFC, что соответствует данным экспертного дешифрирования, согласно которым площадь леса в Волго-Ахтубинской пойме без волжских островов и правобережной прибрежной поймы составляет 34,4 тыс. га [7]. Согласно результирующему растру по данным всех информационных продуктов площадь лесов составила 34,1 тыс. га, что меньше оценки по экспертному дешифрированию, тем более учитывая площади островов.

Средняя лесистость полуострова Сарпинский по данным информационных продуктов типов земного покрова составила от 60 до 74%, что соответствует данным О.Ю. Кошелевой по результатам экспертного дешифрирования, согласно которым лесистость составляет 64,2% [8]. Лесистость

на территории острова Сарпинский по данным информационных продуктов составила от 22 до 33%, по данным В.Н. Бодровой на 2018 г. средняя лесистость острова составляла около 40–45% [6]. Такая разница, возможно, связана с недостаточной точностью информационных продуктов или вспышкой численности ясеневой узкотелой златки после 2018 г., из-за которой множество деревьев на острове погибло [14, 15].

Сравнительный анализ значений лесистости по данным различных информационных продуктов и составленного на их основе результирующего растра (рис. 2) показал, что наиболее тесную связь по величине коэффициента детерминации имеют данные ESRI ($R^2 = 0,87$), также у этих данных угловой коэффициент наиболее близок к единице. Тем не менее данные ESRI существенно занижают лесистость в сравнении с результирующим растром (относительная ошибка – -42%), а также имеют достаточно большую среднеквадратическую ошибку ($RMSE = 8,27\%$). Следующим информационным продуктом по величине коэффициента детерминации является FROM-GLC10 ($R^2 = 0,82$), в среднем по этим данным лесистость завышена на 6,3% при среднеквадратической ошибке $RMSE = 3,94\%$. Информационные продукты ESA и GFC имеют сопоставимые коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,62$, $R^2 = 0,59$ соответственно) и среднеквадратическую ошибку ($RMSE = 6,48$ и $6,3\%$ соответственно) при сравнении с результирующими данными. Тем не менее относительная ошибка при картографировании по данным GFC составляет 19,6%, а по данным ESA – -13,4%.

Таким образом, данные FROM-GLC10 обладают наилучшей точностью среди исследованных продуктов. Данные ESRI хорошо коррелированы с результирующим растром, но существенно занижают площадь лесов, что может свидетельствовать о важности правильного определения лесных насаждений и минимального количества ложных определений. По данным GFC площади лесов существенно завышены, что может быть связано с большим количеством зарослей из тростника и других высокостебельных трав, которые зачастую ошибочно определяются как лес при использовании автоматизированных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли [12]. Данные ESA также имеют недостаточно высокую точность, занижая площадь леса по сравнению с результирующим растром.

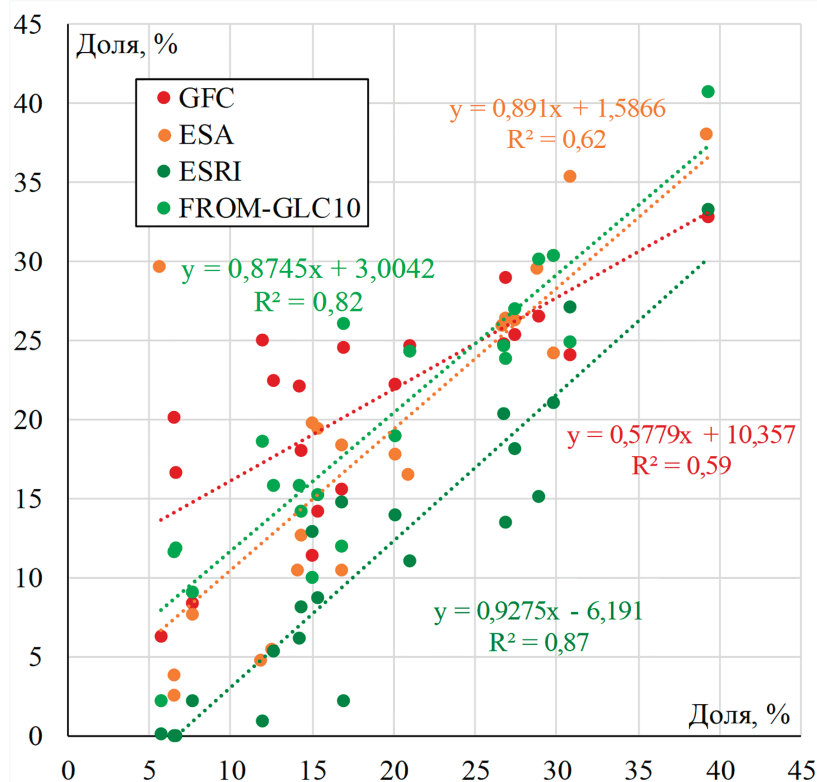


Рис. 2. Сравнение долей лесопокрываемой площади по данным информационных продуктов (вертикальная ось) с результирующей величиной по данным двух и более источников (горизонтальная ось)

Заклучение

В результате исследований была определена лесистость пойменных ландшафтов Нижней Волги в пределах Волгоградской области, полученная величина площади лесов 34,3 тыс. га согласуется с результатами экспертного дешифрирования. Наибольшей точностью характеризуются данные FROM-GLC10 ($R^2 = 0,82$, $RMSE = 3,94\%$), в то время как остальные исследованные информационные продукты по отдельности не обеспечивают достаточную точность при картографировании пойменных лесов. Тем не менее построение результирующего раstra на основе всех источников данных позволило получить электронную карту лесов в пойменных ландшафтах необходимой точности.

Разработанные электронные карты лесных насаждений Волго-Ахтубинской поймы позволят провести мониторинг состояния древостоев как на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, так и с помощью традиционных наземных методов лесной таксации. При регулярном обновлении исходных информационных продуктов типов земного покрова

станет возможным постоянный мониторинг площади лесных насаждений, что даст возможность определить ключевые факторы динамики их состояния.

Список литературы

1. Манаенков А.С., Пономарев А.С. Лесопригодность экотопов Волго-Ахтубинской поймы для культур сосны // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 4 (388). С. 127–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-127-145.
2. Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Korneeva E.A. Assessment of Ecosystem Services of Wetlands of the Volga-Akhtuba Floodplain // Sustainability. 2022. Vol. 14, Is. 18. P. 11240. DOI: 10.3390/su141811240.
3. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Shinkarenko S.S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // Arid Ecosystems. 2018. Vol. 8, Is. 4. P. 231–244. DOI: 10.1134/S2079096118040066.
4. Рулев А.С., Юферев В.Г., Кошелев А.В., Ткаченко Н.А. Дистанционный мониторинг агролесоландшафтов с применением ГИС-технологий // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11. Естественные науки. 2013. № 1 (5). С. 51–58.
5. Сучков Д.К. Геоинформационные технологии в лесном секторе // Успехи современного естествознания. 2023. № 1. С. 69–73. DOI: 10.17513/use.37987.
6. Бодрова В.Н. Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 3. С. 47–54.

7. Васильченко А.А., Грищок А.А. Оценка лесистости Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области // Грани познания. 2020. № 2 (67). С. 9–12.
8. Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Омаров Р.С. Изучение и картографирование ландшафтов полуострова Сарептский на Нижней Волге // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15, № 3 (56). С. 86–96. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-3-86-96.
9. Chen B., Xu B., Zhu Z., Yuan C., Ping Suen H., Guo J., Xu N., Li W., Zhao Y., Yang J.J.S.B. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 // Sci. Bull. 2019. № 64. P. 370–373.
10. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M., Brumby S.P. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
11. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., Souverijns N., Brockmann C., Quast R., Wevers J., Grosu A., Paccini A., Vergnaud S., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Georgieva I., Lesiv M., Carter S., Herold M., Li L., Tsundbazar N.E., Ramoino F., Arino O. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
12. Шинкаренко С.С., Баргалева С.А., Васильченко А.А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 4. С. 207–222.
13. Hansen M., Potapov P., Moore R., Hancher M., Turubanova S., Tyukavina A., Thau D., Stehman S., Goetz S., Loveland T., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C., Townshend J. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342, Is. 6160. P. 850–853.
14. Сергеева Е.С. Экологические последствия инвазии ясеневой изумрудной узкотелой златки, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Vuprestidae), на территорию Нижнего Поволжья // Куражсковские чтения. Материалы II Международной научно-практической конференции / Составитель А.Н. Бармин. Астрахань, 2023. С. 18–21.
15. Orlova–Bienkowskaja M.J., Drogvlenko A.N., Zabaluev I.A., Sazhnev A.S., Peregodova E.Y., Mazurov S.G., Komarov E.V., Struchaev V.V., Martynov V.V., Nikulina, T.V., Bienkowski A.O. Current range of *Agrilus planipennis* Fairmaire, an alien pest of ash trees, in European Russia and Ukraine // Ann. For. Sci. 2020. Vol. 77. P. 1–14.