

**ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ**

Международный сборник научных статей

**FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:
BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING**

International Compendium of research papers

ISSN 2500-4263

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЦЕНТР УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ

Международный сборник научных статей

FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:

BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING

International Compendium of research papers

Йошкар-Ола
2018

УДК 630
ББК 43:20.18
Л 50

Редакционная коллегия:

Э. А. Курбанов, д-р с.-х. наук, профессор, Поволжский государственный технологический университет (отв. редактор)

С. А. Барталев, д-р техн. наук, профессор, Институт космических исследований РАН

С. И. Чумаченко, д-р биол. наук, профессор, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

В. К. Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева

О. Н. Воробьев, канд. с.-х. наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет

Dr. Ioannis Gitas, Associate Professor, Laboratory of Forest Management and Remote Sensing of the Aristotle University of Thessaloniki

Dr. Sha Jinming, Professor, Director of China-Europe Center for Environment and Landscape Management

Dr. Abraham Thomas, Competency Manager of Remote Sensing, Council for Geoscience

Dr. Jinliang Wang, Professor, College of Tourism & Geographic Sciences, Yunnan Normal University

Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность Л 50 и дистанционный мониторинг: международный сборник научных статей / отв. ред. проф. Э.А. Курбанов [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. – 125 с. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

Основу сборника составили материалы международной научной конференции «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: региональные и международные аспекты», цель которой – обмен научным и практическим опытом между учеными, преподавателями, научными сотрудниками вузов и научных организаций и объединение усилий для развития перспективных направлений науки в области лесного хозяйства и экологии.

УДК 630
ББК 43:20.18

© Поволжский государственный
технологический университет, 2018
© Центр устойчивого управления
и дистанционного мониторинга лесов, 2018

Editorial board:

E.A. Kurbanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volga State University of Technology

S.A. Bartalyov, Doctor of Engineering Science, Professor, Space Research Institute of Russian Academy of Sciences

S.I. Chumachenko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Mytishchi Branch, Bauman Moscow State Technical University

V.K. Khlyustov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy

O.N. Vorobiev, Ph.D., Associate Professor, Volga State University of Technology

Dr. Ioannis Gitas, Associate Professor, Laboratory of Forest Management and Remote Sensing of the Aristotle University of Thessaloniki

Dr. Sha Jinming, Director China-Europe Center for Environment and Landscape Management, College of Geography, Fujian Normal University

Dr. Abraham Thomas, Competency Manager of Remote Sensing, Council for Geoscience

Dr. Jinliang Wang, Professor, College of Tourism & Geographic Sciences, Yunnan Normal University

Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring :

F 75 compendium of research papers / Executive editor Prof. E.A. Kurbanov [Electronic resource]. – Electronic data – Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2018. – 125 p. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

The purpose of the international Compendium of research papers "**Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring**" is the exchange of scientific expertise between research staff of universities and research organizations.

UDC 630
BBK 43:20.18

ISSN 2500-4263

© Volga State University
of Technology, 2018
© Center of Sustainable forest management
and Remote sensing , 2018

ACKNOWLEDGEMENT

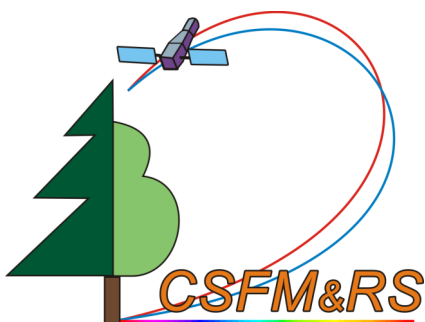
The Jean Monnet center of Excellence —European Expertise and Technology for Environmental Protection and Sustainable Forestry^{ll} at Volga State University of Technology has been funded with sup-port from the EU ERASMUS+ program.

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Центр совершенства Жана Монне «Европейская экспертиза и технологии в области защиты окружающей среды и устойчивого лесоводства» (SUFEX) получил финансовую поддержку Европейского Союза. Этот сборник опубликован в рамках деятельности центра SUFEX.

Содержание сборника отражает точку зрения только ее авторов. Исполнительное агентство по вопросам образования, аудиовизуальной деятельности и культуры и Европейская Комиссия не несут ответственности за любое использование информации, содержащейся в этой публикации.

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



IDENTIFYING INDIVIDUAL WOOD LOCATION FROM TERRESTRIAL LASER SCANNING (TLS) DATA AT FOREST PLOT LEVEL

Guangjie Liu^{1,2,3}, Jinliang Wang^{1,2,3}

¹College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University

²Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities
in Yunnan Kunming

³Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province

Taking the natural forest plot of spruce and fir in the Shangri-La area of northwestern Yunnan, China as a test area, the study explores the method of obtaining forest point cloud data by using terrestrial laser scanning (TLS) under natural terrain and obtaining the position of individual tree at forest plot level to provide a more efficient and accurate method for forest resource surveys. Based on the multi-station splicing of 3D laser point cloud data, the tree identification and location extraction of the layered point cloud data are realized by k-d tree segmentation method, connected component labeling method and random sampling consensus algorithm. After individual tree identification, scanning range and accuracy of identifying trees are compared between the incomplete point cloud data obtained by single-station scanning and the point cloud data acquired by multi-station scanning. The research shows that in the natural coniferous forest plot with flat terrain, based on multi-site cloud data, the RANSAC algorithm can accurately identify each individual tree trunk and its position in a circular plot with a radius of 30 meters, and the rate of accurately identify is 91.45%.

Key words: RANSAC, TLS, point cloud, individual tree location, spruce and fir forests.

Introduction. Forests not only provide material resources for human survival and development, but also play an important role in maintaining ecological processes and ecological balance, especially in protecting fragile ecosystems, waters and freshwater resources. Individual-tree location is a basic important data for forest resource survey and forest structure research. It is a prerequisite for quantitative description and analysis of forest structure. It is of great significance for forest biomass estimation, forest carbon cycle and material flow, and global climate change. In recent years, with the development of remote sensing (RS) technology, especially the light detection and Ranging (LiDAR) technology, using remote sensing data to obtain forest location information has obtained rich research results.

Traditional optical satellite images are limited by spatial resolution, and only large area of forest distribution can be obtained. Images with low spatial resolution are mostly used for land use classification, forest type classification, and forest structure parameter inversion. With the development of remote sensing technology, increasing of sub-meter optical remote sensing data provides a basis for the use of RS data to obtain tree location and forest structure research at individual tree scale. According to the difference of the spectral texture of the canopy of the tree, the individual tree segmentation method is used to realize the tree position extraction based on the RS image data. Satellite images contain a wealth of spatial information, texture information and spectral information, but the segmentation accuracy is closely related to the spatial resolution of images. Compared with low-resolution remote sensing images, high resolution images have very rich information on the shape, structure and texture of the objects, enabling the observation of objects on a small spatial scale and accurate segmentation.

In recent years, TLS have rapidly increased in forest resource survey, management, and planning applications (Srinivasan et al., 2015; Moskal and Zheng, 2011). Among a variety of forest structural parameters, the determination of tree position is the basis for forest structure research, and has important impacts on forest structure, forest intercropping and understory environment, and is also important for forest carbon storage and biomass estimation. At present, the location of forest single

wood based on TLS data is mainly identified by a variety of fitting algorithms, including Hough transform method (Thies and Spiecker, 2004; Liu et al., 2016; Li et al., 2012), circle fitting algorithm (Bienert et al., 2006; Brolly and Király, 2009; Shang et al., 2015) and cylinder fitting algorithm (Brolly and Király, 2009; Wezyk et al., 2007; Čerňava et al., 2017). For example, Li Dan et al. (2012) used the Hough transform method to perform circle detection on the rasterized layered point cloud data to estimate the DBH of the birch forest plot and obtain the position information of the single wood. Bienert et al. (2006) used the method of circle fitting to extract the DBH information of trees more accurately. It is believed that in the place where the forest density is large, the trunks will block each other and the accuracy of the extraction of the DBH will be reduced, resulting in the tree position not being automatically recognized. At present, the extraction of location based on TLS forest is to improve the efficiency of the algorithm. The method of breast diameter extraction based on circle detection or fitting needs to rasterize the point cloud data, which reduces the availability and extraction accuracy of the data. Focusing on individual tree scale research, there is a lack of multi-tree species, multi-forest age complex forest-scale environment for the study of forest structure extraction.

The forest plots of natural spruce mature forests in the Shangri-La area of northwestern Yunnan were used as experimental areas. Based on the pre-processing of point cloud data, such as splicing and de-weighting, the improved morphological filtering method was used to effectively segment ground points and non-ground points to Realize the point cloud to be highly normalized. Hierarchical segmentation of point clouds is implemented using octree segmentation and connected component notation. Based on the segmentation point cloud, combined with the k -d tree and RANSAC algorithm, the recognition of each wood position of the sample site is realized and the accuracy of tree identification of forest sample trees obtained by single station scanning method and multi-station scanning method is compared.

Materials and Methods

Point cloud at Forest Plots. This study used Leica P40 to acquire high-precision 3D point cloud data. The P40 is Leica's latest generation 3D laser scanning device for fast obtaining high-density point cloud data and panoramic images. Main performance indicators of the device are shown in Table 1.

Table 1

Main performance indicators of Leica P40

Indicators	Descriptions
Range Accuracy	1.2 mm + 10 ppm
3D position Accuracy	3 mm @ 50 m 6 mm @ 100 m
Wavelength	1550nm (invisible); 658 nm (visible)
Scan Rate	Up to 1000000 points per second
Field-of-View	360° (Horizontal); 290° (Vertical)
Range and Reflectivity	Minimum range: 0.4 m Maximum range at reflectivity: 120 m (8%), 180 m (18%), 270 m (34%)
Range Noise	0.4 mm RMS at 10 m 0.5 mm RMS at 50 m

The study used point cloud data to obtain natural forest plots from spruce and fir forests in Shangri-La, Yunnan, China. The TLS technology acquires 3D point cloud data by using a single point fixed to scan the surrounding area in a panoramic manner. Due to the mutual occlusion and terrain fluctuations between the trees, the single station scanning method cannot obtain the point cloud information of all the trees in the forest plot (fig.1).

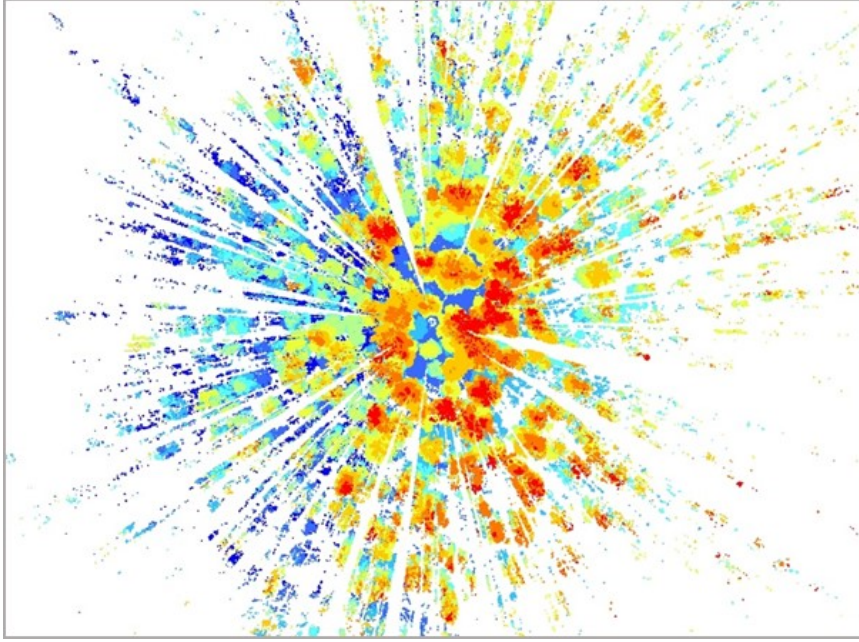


Fig. 1. Point cloud data scanning by one station at the center of the plot

To obtain point cloud data as completely as possible, the study uses a multi-station measurement around the center of the plot. We scan 5 stations in each plot including 1 station in the center of the plot, using a more detailed scanning method, scanning for 10 min, and obtaining a panoramic photo of the scan range. There are 4 stations on the edge of the plot, and time of scanning is 5 minutes (fig. 2). Four types of dominant forest species (*Pinus yunnanensis* Franch., *Pinus densata* Mast., *Picea* Mill. & *Abies fabri* (Mast.) Craib, *Quercus semecarpifolia* Sm.) are investigated in Shangri-La, northwest of Yunnan, China. To avoid the influence of different tree species morphological differences on the accuracy of the results, the study selected the dominant forest species as the mature forest plots of spruce and fir forest.

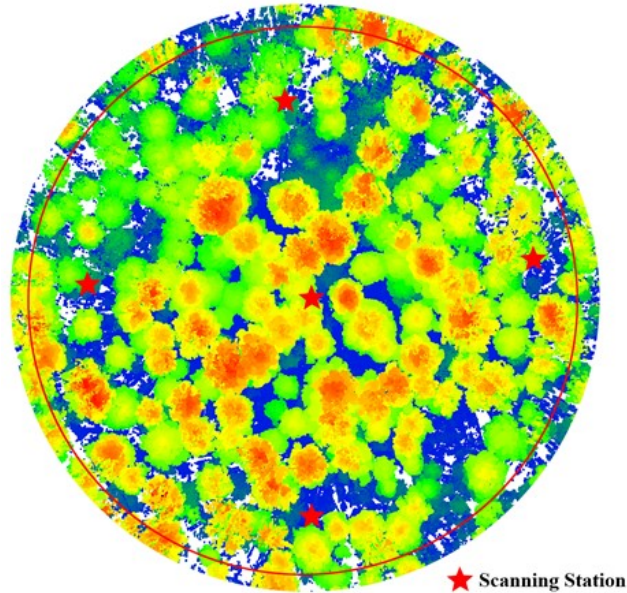


Fig. 2. Point cloud data scanning by multiple stations

Technology roadmap. Based on the hierarchical segmentation of point clouds by octree and connected component markers, the method of Random sample consensus (RANSAC) is used for individual tree identification and individual tree positioning. The RANSAC algorithm was first proposed by Fischler and Bolles (1981) and it is one of the basic methods for identifying geometric

shapes from images in image processing. The algorithm iteratively estimates the parameters of the mathematical model from a set of observed data containing outliers. Based on the random sampling consensus algorithm, the point cloud is hierarchically segmented according to the characteristics of the forest plot and the relevant algorithm parameters are set to improve the recognition accuracy and extraction efficiency. The main research processes include point cloud data preprocessing, point cloud height normalization, point cloud segmentation and identification of tree trunk. The technical route is shown in fig. 3 detailed.

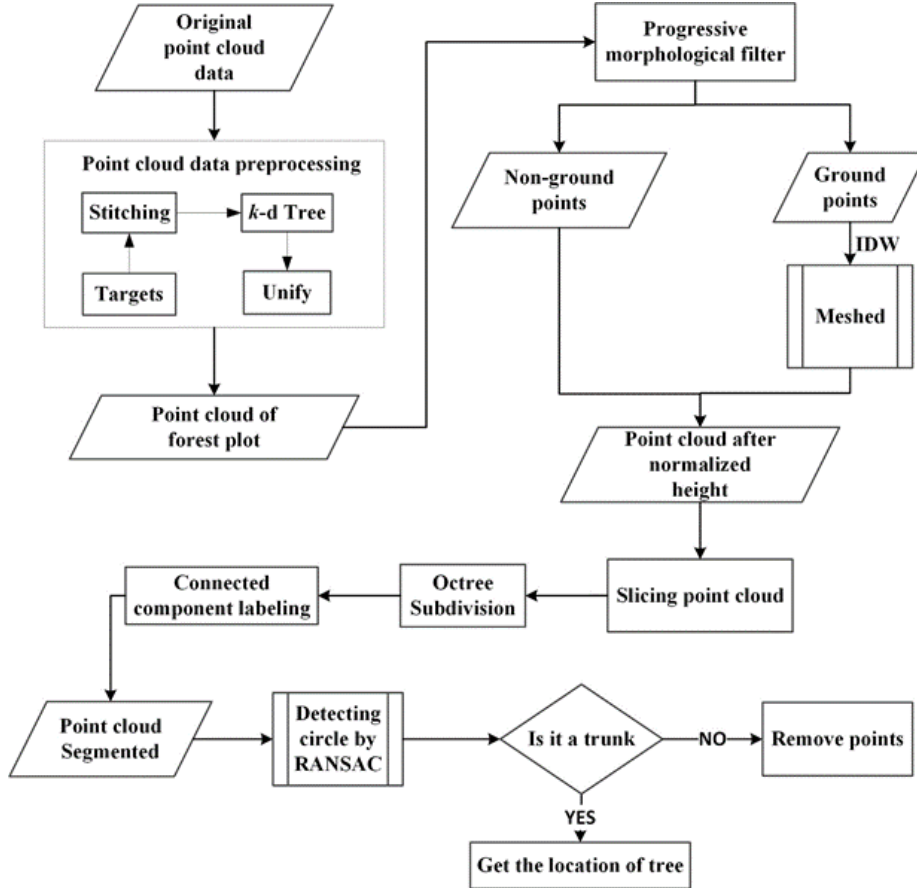


Fig. 3. Flowchart detailing the method in this study

Point cloud preprocessing. When collecting forest point cloud data, it will be affected by many objective factors such as acquisition equipment, collection environment and different shape of trees, such as terrain fluctuation, laser scanner scanning range limitation and tree trunk obstruction. It is difficult to obtain complete point cloud data of the measured object from one perspective. Currently, the acquisition device needs to measure the measured object multiple times from different perspectives. Point cloud data registration is to splicing point cloud data collected from different perspectives, so that local point cloud data from different perspectives can be converted to a unified coordinate system, and then complete point cloud data of the measured entity or scene can be obtained. In the process of point cloud data scanning, the study uses Leica black and white targets to arrange matching points to ensure that there are at least two matching points in adjacent stations. Then, the multi-site cloud data is registered and stitched according to the target information. As shown in the fig. 2, the spliced point cloud records the tree trunk information of the plot, which provides basic data for trunk identifying and location extracting.

The density of TLS point cloud is very high, so multi-site cloud data after splicing has a lot of redundancy. To improve the efficiency of point cloud processing, the deduplication of point cloud data is studied, and the time cost in the data processing process is reduced under the premise of en-

surging the accuracy of data extraction. Based on the k -d tree partitioning of point cloud data, the point cloud deduplication is realized by judging the distance between point clouds.

The k -d tree is a tree-shaped data structure that stores data points in k -dimensional space for quick searching. Each node of the k -d tree corresponds to a k -dimensional super-rectangular region. Compared with the spatial grid partitioning method and the octree method, the k -d search tree improves the time of spatial recursive search and is more advantageous in terms of computational efficiency and robustness (Zhou, Hou et al. 2008). It uses the exhaustive method to calculate the Euclidean geometric distance r from the point P_i to the neighboring points, arranged in ascending order, and the first k points are the k domain points of the data points (fig. 4).

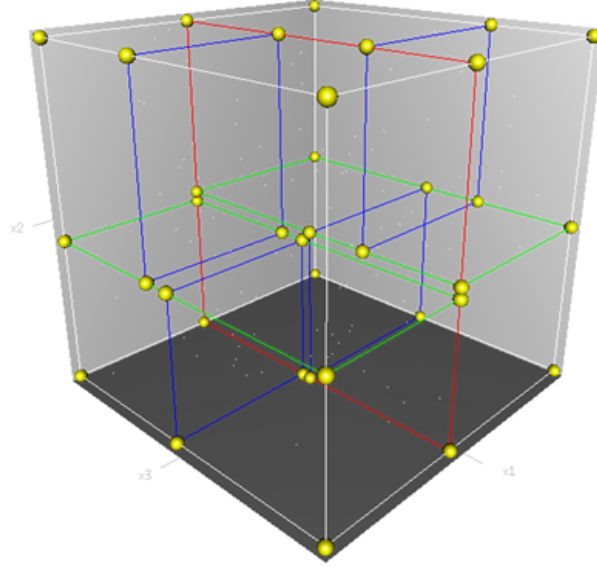


Fig. 4. Spatial k -d tree segmentation

Normalization of point cloud height. The change of terrain has a great influence on processing of point cloud data. To avoid the influence of terrain on tree recognition and extraction, it is necessary to normalize point cloud data to remove the influence of terrain changes on point cloud morphology. The study uses improved morphological filtering methods to separate ground point clouds from non-ground point clouds. The main idea of the algorithm is based on the mathematical morphology method, using the open operation (corrosion, re-expansion) to process the point cloud, and using the progressive filtering window to gradually separate the ground point and the ground point. The ground point cloud is interpolated and gridded by inverse distance weighted (IDW). Finally, the generated ground grid is used to highly normalize the point cloud to eliminate the difference in height of the trees caused by the terrain height difference (fig. 5)

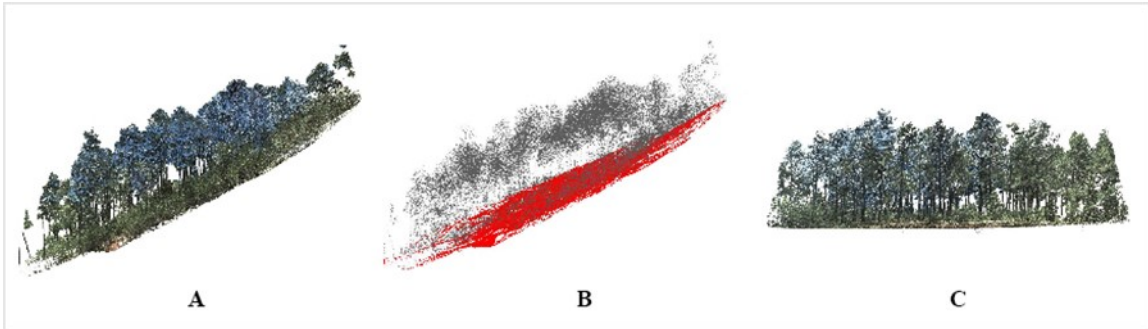


Fig. 5. Normalization of point cloud height:

A) Original point cloud data acquired using TLS; B) Filtering results with ground points in red and non-ground points in gray; C) Points with normalized height

Point cloud layering. When obtaining point cloud data of forest plots with higher density or thicker shrubs under the forest, it is easier to block the trees and cover the trunks under the bushes, resulting in the trunk point cloud obtained at a certain height is incomplete, and the loss or misidentification of trees is prone to occur. Many studies have shown that the method of layering the point cloud of the trunk can effectively improve the recognition accuracy of the tree. Different from the existing research methods of layered rasterization of collected point clouds, to ensure the accuracy of point cloud data and make full use of the acquired data, the research directly uses point cloud data for processing. Starting from 1.00 m, 0.10 m is the interval, 0.06 m is the standard for point cloud stratification, and 0.97 m-1.53 m point cloud is divided into 6 layers, each layer is 0.97 m-1.03 m, 1.07 m- 1.13 m, 1.17 m - 1.23 m, 1.27 m-1.33 m, 1.37 m-1.43 m, 1.47 m-1.53 m.

Octree segmentation and connected component labeling. To reduce redundancy and improve processing efficiency and accuracy, octree segmentation and connected component labeling are combined to segment the point clouds before trunks are identified. The method of connected component labeling (Dillencourt et al. 1992) is usually used to detect connected areas of binary images in the field of computer vision. It can be used for processing color images and higher dimensional data as well. Different from the image data, point cloud data is composed of a large number of independent, discrete points with spatial coordinates. Therefore, the method of octree segmentation is used to obtain voxelization data of the hierarchical point cloud. Voxelization is a processing of point cloud segmentation based on octree. First, a closed minimal cube is determined as a root node or a zero-level node, and then the root node is subdivided into eight sub-pixels recursively. Non-empty voxels continue to be divided until they are divided into the remaining thresholds or the minimum pixel size criteria are reached (Vo et al. 2015).

The raw point cloud contains many useless points (shrubs, weeds, etc.). With the increasing depth of octree, the points are divided into relatively independent spaces. When the octree level = 10, trunks, shrubs and weeds show better separability (Liu et al. 2018). By further increasing the depth of the octree, the original separability between the trees is maintained, but the amount of data has increased substantially. Therefore, this study uses the octree segmentation method with octree level = 10 to voxelize each layer of cloud data of trunks. Based on voxelization of points, we use the method of connected component labeling to get point cloud voxels connected and complete the segmentation of tree stem form stratified point clouds. The segmentation results shown in fig. 6.

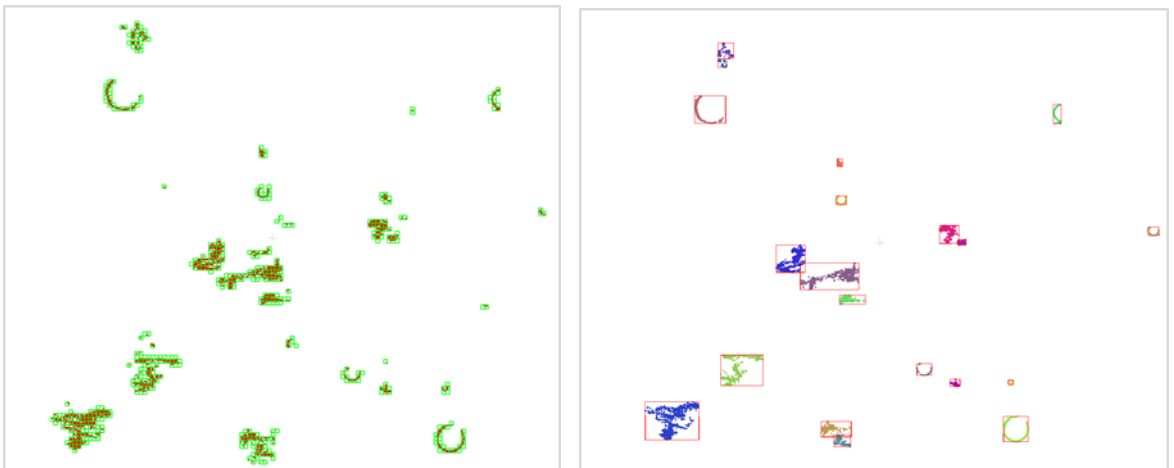


Fig. 6. Processing of octree segmentation (left) and connected component labeling (right) (top view)

Improved RANSAC algorithm to fit the circle. The basic idea of the RANSAC algorithm is to search for points satisfying the condition in the data point set, randomly sample a smaller subset of data, and then fit it to find out how many other points can match the fitted conditions. Repeating the above process until you find the expected object structure model. When applying the algorithm, we

need to design a judgment criterion, then loop continuously to eliminate the extra-point, and fit the obtained correct points to form a new model. Iterations to all outliers are eliminated, and the model aggregates all in-house points in the dataset. Identifying the trunk from the forest point cloud is intended to fit the discrete three-dimensional coordinates of the trunk portion to a circle, as follows:

(1) First, the point set P is projected onto the X - Y plane in the direction of Z -axis to form a 2-D point cloud set P' . Three points $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$, $p_3(x_3, y_3)$ that are non-collinear and the distance between any two points is greater than 0.02 m are selected from the point cloud set P' randomly. The equation of three non-collinear points $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$, $p_3(x_3, y_3)$ can be expressed as:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

The distance conditions between the points are:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} &> 0.02; \\ \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} &> 0.02; \\ \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} &> 0.02. \end{aligned} \quad (2)$$

Then, these 3 points can form a circle C_1 , and the center point $O_1(a_1, b_1)$ and the radius r_1 of the circle can be obtained. According to our field survey results, if $r_1 > 0.7$ or $r_1 < 0.03$ (trees with DBH larger than 1.40 m or less than 0.06 m are not extracted), a new set of three points should be selected for calculating the radius r_1 until r_1 satisfies $0.03 \leq r_1 \leq 0.7$.

(2) Based on the k -d tree partitioning iteratively judges the spatial distance relationship between the remaining point cloud $p_i(x_i, y_i)$ in point cloud data set P' and the constructed circle C_1 until all the extra-office points are excluded, and all the intra-office points are accurately identified. The judgment condition of inliers $P_j(x_j, y_j)$ is:

$$r_1 - 0.02 < \sqrt{(x_j - a_1)^2 + (y_j - b_1)^2} < r_1 + 0.02. \quad (3)$$

Number of inliers that satisfies the condition is M . Points that do not satisfy the condition are outliers, and the number of that is N .

The next condition need to be tested is the relative position between any point (x_i, y_i) in point cloud P' and the circle $C_1(a_1, b_1, r_1)$:

$$\sqrt{(x_i - a_1)^2 + (y_i - b_1)^2} < 0.7 * r_1. \quad (4)$$

Equation 4 indicates that there are points inside the identified trunk, which are inconsistent with the actual results and should be excluded from the circle that satisfies the result.

This method is repeatedly performed on the remaining point clouds until the elements in P' are depleted, so that the final M and N are obtained. Getting the voting result that satisfies the Formula (5) in M .

$$\begin{aligned} \frac{M}{N} &> \varepsilon; \\ M &> \delta. \end{aligned} \quad (5)$$

where, ε is the threshold value of a circle detected for sliced point cloud of trees, δ is the minimum number of data points required to estimate model parameters. Many tests in the study show that the accuracy of DBH extraction is high when $\varepsilon = 0.80$ and $\delta = 200$.

(3) Using this method, all layers of point clouds are extracted, and the trunk position and the trunk section radius of each layer of trees are obtained. If the position of tree trunk is detected in four or more layers, it is assumed that there is a tree at this position, and the individual tree position is the center of the trunk closest to the ground. If a trunk can be accurately identified at a height of 1.30 m, position of the tree is diameter of the circle identified. If the trunk cannot be identified, the

linear regression method is used to fit the trunk radius and trunk height to obtain the position.

Results and Discussion

Trunk identification at individual tree scale. The above method was used to carry out tree identification and position extraction experiments on a natural mature forest plot of a spruce in the Shangri-La area. The result of this research method for single wood identification is shown in the fig. 7. The RANSAC algorithm has a good recognition degree for the complete circular trunk point cloud (fig.7-A), which can accurately identify the trunk and the center of the circle, even if there is a certain unevenness on the surface of the tree point cloud data. For circular incomplete sparse point cloud of trunks, as shown in fig.7-B and fig.7-C, the algorithm can also accurately identify trunks and obtain the center position of the trunk. However, for the identification of non-circular trunks (ellipse, irregular shape, etc., fig.7-D), the algorithm has certain limitations. Although the trunk can be identified, the accuracy of obtaining its position is lower than that of the circular trunk.

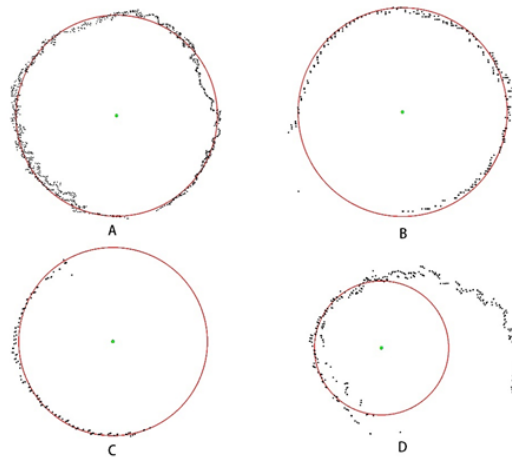


Fig. 7. Trunk identification results at individual tree scale

Trunk identification at plot level. The forest plot is the basic unit for conducting forest resource survey. The composition of the trees in the plot, the spatial structure of the trees and the type of the community can represent the overall status of the forest to a certain extent. Therefore, the accurate identification and location of forest trees is the basis for the use of lidar technology for forest resource surveys. Based on the forest-like location cloud data, based on the hierarchical segmentation of the point cloud, RANSAC was used to obtain the position of each wood in the plot (thoracic height position, the trunk center point at 1.3 m from the ground). The result is shown in the fig. 8 and fig. 9.

It is easily affected by mutual shelter between trees when TLS is used to acquire forest point cloud data. Among them, mutual obstruction between trunks results in lower accuracy of identifying tree. To clear the influence of forest occlusion on tree recognition accuracy, the accuracy of tree identification using single-station scanning point cloud and multi-station scanning point cloud data using RANSAC algorithm is studied. It can be seen from the fig.9 that in the circular sample area (sample radius = 35 meters), the point cloud data obtained by scanning with

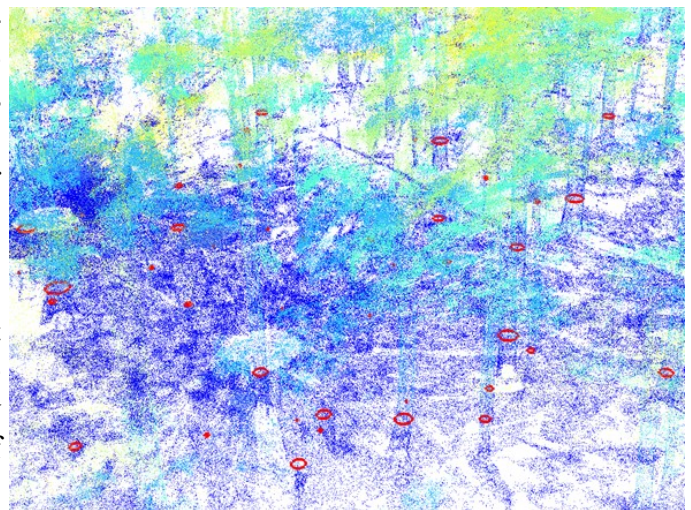


Fig. 8. Result of trunk identification at plot level

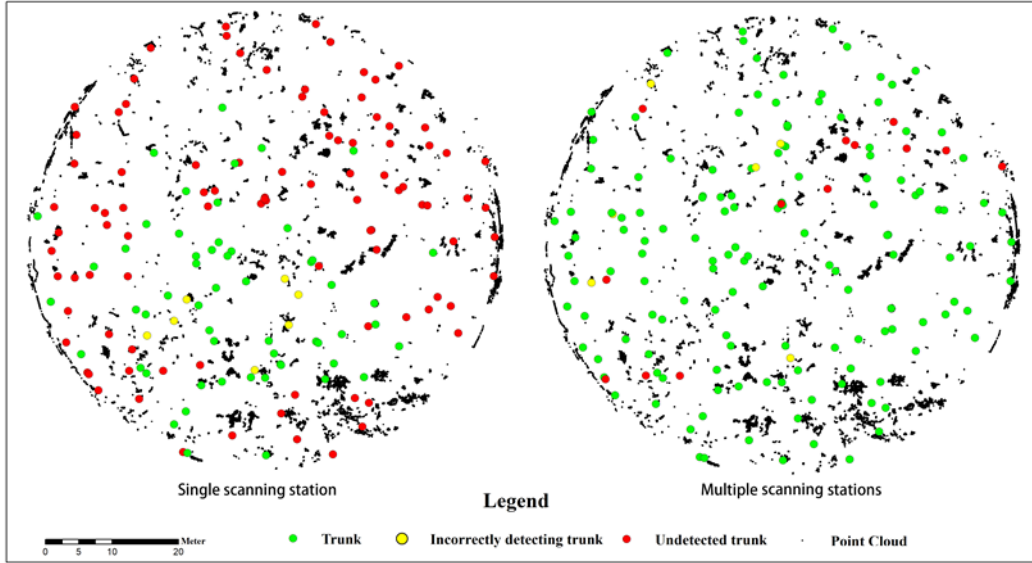


Fig. 9. Result of trunk identification by single scanning station and Multiple scanning stations

a single-station ground-based lidar in the center of the sample center is incomplete due to the trunk point cloud information. The algorithm can only accurately identify the trunk within a certain range (within 10 meters), and there is a high recognition error rate.

It can be seen from the Table 2 that the point cloud using single-station scanning can correctly identify 56 trees with 7 errors and an error rate of 11.11%. From the perspective of the whole plot, 96 trees were missed, and the missed detection rate was as high as 63.16%. The trees at the edge of the plot could hardly be identified accurately. The point cloud data obtained by multi-station scanning is more complete than the single-station scanning, covering the entire sample area, and there is a certain missing tree trunk only in the area where the sample edge and the tree density are large. It can be seen from the statistical data of the whole plot that the multi-station scanning method correctly identifies 139 trees and misidentified 6 trees, the error rate is only 4.14%, 13 trees are missing detection, and the missed detection rate is 8.55%. The tree recognition accuracy is greatly improved compared to the single station scanning method.

Table 2

Accuracy comparison of results from different scanning methods

Scanning Methods	Correctly identify trees	Error	Error rate	Undetected trees	Undetected rate
Single scanning station	56	7	11.11%	96	63.16%
Multiple scanning stations	139	6	4.14%	13	8.55%

Conclusions

The mature forest sample plot of spruce and fir in Shangri-La area of Northwest Yunnan was taken as the experimental area. Based on the pre-processing of point cloud data, such as splicing and de-weighting, the improved morphological filtering method was applied to effectively segment ground points and non-ground points, and the normalization of point cloud height was realized. Hierarchical segmentation of point clouds is implemented using octree segmentation and connected component notation. Based on the segmentation point cloud, combined with the k -d tree and RANSAC algorithm, the recognition of each tree position of the sample site is realized and the accuracy of tree identification of forest sample trees obtained by single station scanning method and multi-station scanning method is compared.

The research results show that multi-site cloud data can accurately record the forest structure information in the sample area compared with the single station measurement, and the forest

structure can be accurately restored through multi-station splicing. Although the improved morphological filtering method is designed for airborne point cloud design, it can be applied to the ground-level cloud data obtained by ground-based lidar by adjusting the algorithm parameters and can effectively separate the ground point cloud and non-ground Points. Using point cloud data compared to traditional total station and other measurement techniques, it is possible to obtain information on the position of each wood in the natural forest plots quickly and accurately and provide new technical and data support for accurate forest resource survey and forest internal structure research. The research combined with point cloud hierarchical segmentation method and RANSAC algorithm reduces the time complexity of random acquisition point cloud algorithm, effectively improves the efficiency of tree trunk recognition, and provides a feasible method for each wood location identification of sample scale. Although the research uses the RANSAC algorithm to extract the location of single trees, there are still some shortcomings. For example, the Yunnan region of China is a plateau mountainous region with complex topography and natural forests distributed in mountainous areas, and the 3D laser scanning data is susceptible to terrain fluctuations. However, the study did not assess the impact of topographical changes on the accuracy of individual tree identification. The RANSAC algorithm can accurately identify circular trunks, and the recognition accuracy of non-circular trunk point clouds (such as ellipse, irregular shape, etc.) will be reduced or even impossible to accurately identify. In the subsequent research, we should further focus on the influence of terrain changes on the accuracy of the algorithm and use a variety of geometric shape fitting algorithms to more accurately and accurately identify the trunk.

List of references

1. Srinivasan, S., Popescu, S.C., Eriksson, M., Sheridan, R.D., Ku, N.-W. Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sensing*, 2015, 7, 1877
2. Moskal, L.M., Zheng, G. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 2011, 4, 1-20
3. Thies, M., Spiecker, H. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *Forest*, 2004, 2, 1
4. Liu L. X., Pang Y., Li Z. Y. Individual Tree DBH and Height Estimation Using Terrestrial Laser Scanning (TLS) in A Subtropical Forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52, 26-37
5. Li D., Pang Y., Yue C. R., Zhao D., Xue G. C. Extraction of individual tree DBH and height based on terrestrial laser scanner data. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34, 79-86
6. Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mullooly, G., Mohan, F. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36
7. Brolly, G., Király, G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2009, 5, 119-130
8. Shang R., Xi X. H., Wang C., Wang X. L., Luo S. Z. Retrieval of individual tree parameters using terrestrial laser scanning data. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40, 78-81
9. Fischler, M. A., Bolles, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, 24, 381-395
10. Wezyk, P., Koziol, K., Glista, M., Pierzchalski, M. Terrestrial Laser Scanning Versus Traditional Forest Inventory First Results from The Polish Forests. *Tanpakushitsu Kakusan Koso Protein Nucleic Acid Enzyme*, 2007, 44, 325-337
11. Čerňava, J., Tuček, J., Koreň, M., Mokroš, M. Estimation of diameter at breast height from mobile laser scanning data collected under a heavy forest canopy. *J. FOR. SCI*, 2017, 63, 433-441
12. Zhou K., Hou Q., Wang R., Guo B. Real-time KD-tree construction on graphics hardware. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27, 1-11
13. Dillencourt, M.B., Samet, H., Tamminen, M. A general approach to connected-component labeling for arbitrary image representations. *Journal of the ACM (JACM)*, 1992, 39, 253-280
14. Vo, A.-V., Truong-Hong, L., Laefer, D.F., Bertolotto, M. Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 104, 88-100
15. Liu, G., Wang, J., Dong, P., Chen, Y., Liu, Z.J.F. Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level, *Forests*, 2018, 9, 398

ASSESSING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON MOUNTAIN FORESTS: A BRIEF REVIEW

G. Bottaro, D. Pettenella
University of Padova

The effects of climate change on natural ecosystems are increasingly more visible. Being mountain forest ecosystems the most vulnerable and therefore the most affected ecosystems, they appear to be the most suitable for the assessment of climate change effects on ecosystem services. Accordingly, the paper reviews the literature on the economic assessment of climate change impacts in European mountain forests. Initially, the trends in the provision of mountain forest ecosystem services are discussed. The literature review also takes into account the effects on forest structure and trees physiology, being these two effects strictly associated with the capability of the ecosystem to provide services. The results of this first part of the paper have been presented into a table that displays both the trends and the quality and the quantity of the information available. Subsequently, the main methods that can be employed to assess the economic value of the different ecosystem services have been described. For each method some examples of implementation have been described. In the conclusion, the main gaps still existing in scientific literature concerning the effects of climate change on ecosystem services provided by mountain forests have been highlighted. Because of the heterogeneity of the considered ecosystems it is of fundamental importance to have a comprehensive view of the phenomenon. Finally, some more remarks about the existing methods for the economic valuation of ecosystem services has been done.

Key words: climate change, mountain forests, economic damages, ecosystem services, Europe.

1. Introduction

Climate Change (CC) is one of the main drivers of changes in mountain ecosystems and in their related services provision, being more vulnerable than others to the changes in temperature and precipitation (Beniston, 2003). The upper shift of species and consequently their adaptation to changes is limited by the long-time span of trees that cannot react quickly to the changes and the limitation of their altitudinal range (Lindner et al., 2010). For these reasons forests located in mountain areas are the most appropriate ecosystems for CC detection (Ding et al., 2016). The purpose of this study was to address the growing societal demand on Ecosystem Services (ES) provided by mountain regions, which support a large number of components essential for human health and well-being (water, quality of food products, biomass, flood prevention, tourism and recreation, etc.) (Briner et al., 2013).

According to the new version of the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES, V5.1, <http://cices.eu/resources/>, Haines-Young and Potschin, 2018) ES can be divided in three main categories: provisioning, regulating and cultural. Provisioning services are those services related to the goods provided by ecosystems. Regulative services are those services that have a regulative function (e.g. erosion control, water purification, climate control). Cultural ecosystem services comprise aesthetic, spiritual, recreational and touristic value. It is important to quantify and value the provision of ES through numerical and economic indicators in order to be able to monitor and compare them and consequently to address them in political and economic discourses. In such a way the value of ecosystems can be presented to stakeholders through the value comparison of material goods and intangible services (Grêt-Regamey et al., 2013). Whether provisioning services are easier to assess and value, most of regulative and cultural services cannot be measured in market terms, since the methods to quantify them and to assess their value have only recently been developed.

In the valuation of ES, using the terminology of the Cost-Benefit Analysis, a basic distinction should always be made between the financial analysis, which assesses the incurred expenditures

and gained revenues, and the economic analysis, which is aimed at detecting the real value of ES for the society, taking into account the positive impacts (benefits) and the negative ones that cannot be described by the market prices. This kind of analysis tries to include the so called Total Economic Value (TEV) of the ES that incorporates not only their market values (wood, non-wood forest products, water, etc.), but also all their intangible benefits and costs (Thorsen et al., 2014). While the literature connected with the financial analysis of mountain forest ES has a long tradition in terms of the role and importance of provisioning services (with a focus on wood products), the economy analysis of the total value of forest ES in mountain regions has been randomly carried out. Moreover, notwithstanding the mentioned socio-economic characteristics of mountain forest ES (diversity and multiplicity of the ES, high perceived values, relevance and non-market benefits) there is no systemic analysis of the literature on their economic assessment. Our research's objective was to contribute to existing knowledge through a literature review on the economic assessment of CC effects on mountain forest ES with a special focus on European mountain regions.

This study has been conducted within the Belmont project “ClimTree”. The project aims at the analysis of ecological and a socio-economic impact of CC on mountain forest in Europe.

2. European mountain forests

Mountains cover 29% of the EU territory and in this area the most diffuse land use is forest covering 41% of the total mountain areas (EEA, 2010; Hartl et al., 2015). Global warming does not evenly affect Europe, its impact varies depending on a bioclimatic region allocated at different elevations and latitudes (Rogora et al., 2018). Furthermore, the impact of climate change on forest ecosystems also depends on the bioclimatic zone and on the resulting forest types (EFI, 2008; Lindner et al., 2010).

The main European bioclimatic zones are polar, boreal temperate and Mediterranean. Because of the absence of forest in polar areas, the focus of our research has been on the other three regions. Within the temperate region an important distinction has to be made between the oceanic and the continental sub-areas. The bioclimatic map of the European countries is presented in Fig. 1. Besides, the alpine region was considered to better represent the characteristics of the main European mountain ranges: the Alps, the Pyrenees and the Carpathian (Lindner et al., 2010).

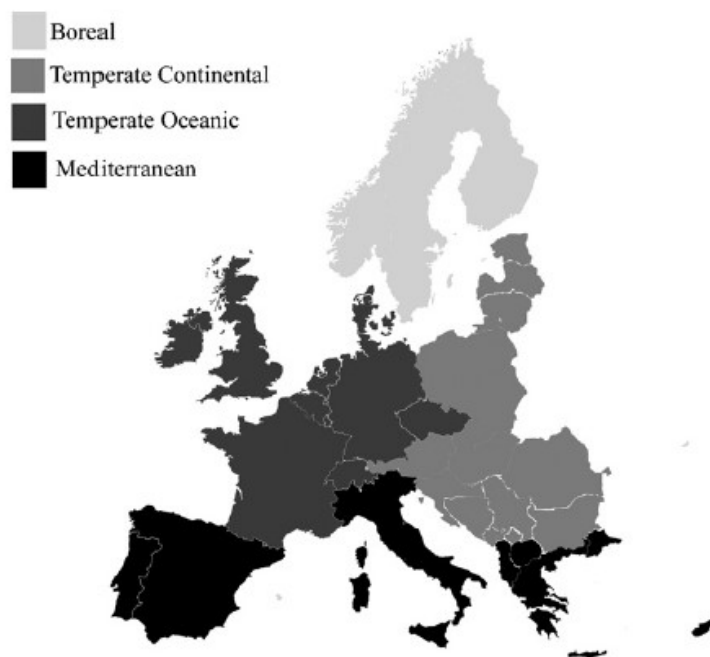


Fig. 1. European countries classification divided by bioclimatic areas (Lindner et al., 2010)

3. The methodological approach

In order to estimate the economic impact of CC on the provision of European mountain forest ES we have organized our research in two stages: firstly, we have tried to describe the impact of CC on the ES, and secondly we have analysed the approach employed for their quantification and economic assessment. In order to meet the first objective, the bibliography analysis has included also the effect of CC on trees physiology and forest structure (Kurbanov et al., 2007), due to the fact that changes in forest structure are strictly related to the ecosystem capability in delivering ES (Brockhoff et al., 2017).

We used the Scopus bibliographic database as the source of data for our research.

4. Climate change impacts on the provision of mountain forests and Ecosystem Services

The data found as a result of literature review are summarised in Table 1. The trends of the CC impact on the provision of mountain forest ES are grouped in four categories: “increasing”, “decreasing”, “stable” and “mixed”. Depending on the quantity and quality of evidence and correlation between them, the obtained data has been classified as follows: “established but incomplete”, “well established” and “unresolved” with a similar approach used by IPBES (2018).

Provisioning services. Changes in Net Primary Production (NPP), that influence timber provision, have different trends in diverse bioclimatic areas. In the Mediterranean region the increment results are negatively affected principally by water scarcity (Fyllas et al., 2017; Rogora et al., 2017; Scarascia-Mugnozza et al., 2010; Linares et al., 2009). The opposite trend has been detected in the boreal region where temperature results tends to be the most limiting factor; in this region the climate change is thus enhancing forest productivity, even if winter frost has a negative impact on it (Kullman, 1996). In temperate region the trend is more heterogeneous with different impacts according to the local and environmental conditions, especially related to water and temperature (Lindner et al., 2010; Loboda et al., 2016; Kurbanov and Post, 2002). In north-western part of the temperate oceanic region the tree growth and increment is slightly higher as a result of temperature increase. This factor significantly influences the tree growth in the area. While in more south-eastern and temperate continental regions water scarcity is reducing radial growth dynamic (Panayotov, 2016; Horak et al., 2014; Friedrichs et al., 2009). Finally, alpine areas are characterized by a general increase in timber production (Rogora et al., 2017) with the presence of an inverse trend where soil moisture is not enough to support a higher photosynthetic rate (Galiano et al., 2010; Meining et al., 2004).

Regulating services. Due to carbon sequestration, forests play an important role in climate regulation, being able to store CO₂ above the soil level. Moreover, tree canopies can modify the albedo of the land surface. For instance, in boreal region the expansion of forests is changing the capacity of forest ecosystems to mitigate climate changes because forest expansion decreases the albedo (Beniston, 2003).

Regarding carbon sequestration, the impact of CC on this ES varies in different regions. In fact, being strictly related to tree growth, stand capacity of carbon stocks follows the pattern that is similar to tree radial increment. For instance, in temperate continental region the carbon uptake is negatively impacted by the higher temperature and lower precipitation because of the reduction of trees photosynthetic rate (Horak, 2014). In alpine and Mediterranean areas CO₂ absorption can follow different patterns: in some regions the carbon uptake is enhanced by the global warming due to the longer growing season and the earlier melting of snow or else, due to the rise up of the timberline (Rogora et al., 2017). In some other regions the negative impact is recorded due to the lower capacity of forest soils to store organic carbon mainly caused by accelerated decomposition of soil organics (Prietz et al., 2014). In this second case Mediterranean mountain forests are generally limited in their carbon adsorption capability because of water stress (Scarascia-Mugnozza et al., 2010) or insect defoliation (Jacquet et al., 2012).

Another important regulating service provided by mountain forests is pest control. Several studies assessed the expansion on insects' range, winter survival, frequency of pest outbreaks (e.g. Battisti and Larsson, 2015; Pureswaran, 2018). Generally, pests spread depending on the altitudinal gradient, even if latitudinal expansion seems to be prevalent (Battisti and Larsson, 2015). In the Mediterranean region pest control in mountain forest ecosystem is harder to manage in comparison with the other regions due to vulnerability of trees caused by water scarcity (Scarascia-Mugnozza et al., 2010).

Concerning biodiversity, in the recent years it has increased in most of Europe. The regions that experienced a decrease in species richness are the Mediterranean and the alpine area (Pauli et al., 2012). Even if in some papers no indicators regarding abundance or species richness are used, the general information about the change in species composition is present (e.g. Galiano, 2010).

CC also affects the dynamics of disturbances such as fire, insects and wind making forests more vulnerable and affecting their capability of natural hazards regulation. In their paper Seidl et al. (2017) analysed the correlation between CC and natural disturbances and argues there was a direct interrelation between them.

5. Economic evaluation of climate change damages in mountain forests

We identified the effects of Climate Change that affect the capability of mountain forests on the provisioning of ecosystem services in the different European bioclimatic areas. In order to understand what economic impacts are caused by these changes it is necessary to estimate the value of the forest ES considered. Several methods have been developed and different frameworks have been designed in order to systematize and to classify them. Hereafter the framework developed by Masiero et al. (2018) in their manual "Valuing forest ecosystem services: A training manual" [under press] it has been used as reference (Fig. 2).

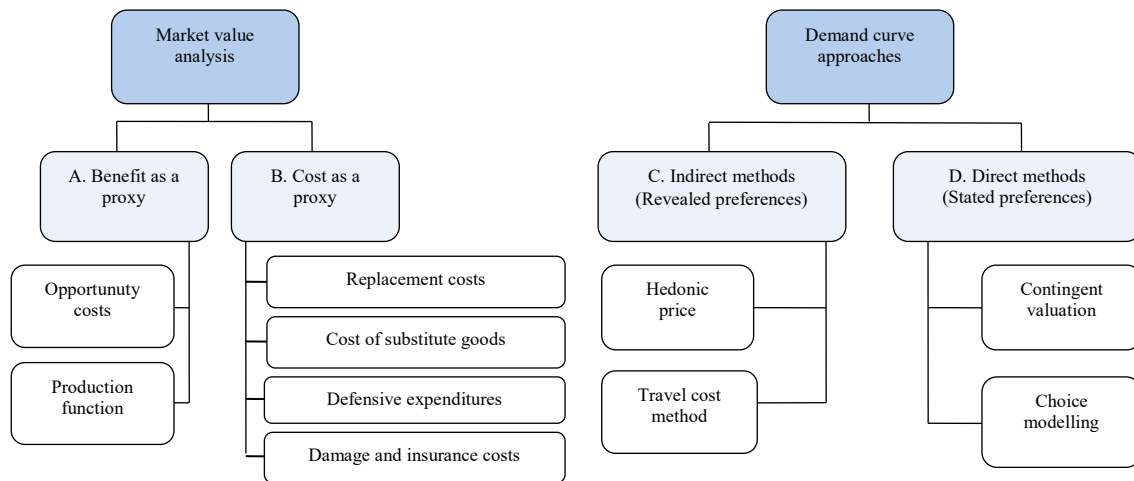


Fig. 2. Methods that can be used to evaluate Forest Ecosystem Services (Masiero et al., 2018). Valuing forest ecosystem services: A training manual. FAO, Rome [under press])

We will briefly outline the cases found as a result of literature review with the reference to the methodological approach framework described in Figure 2, while in Table 2 different mountain forest ES are cross-checked with the methods used for their economic valuation with reference to the literature review.

The methods used for value assessment (financial and economic) of mountain forest ES can be divided in two main categories: Market Value Analysis and Demand Curve Approaches. In the first sub-subparagraph (5.1) the cases where methods included in the first category will be taken into account and described, while in the second sub-subparagraph (5.2) the cases where methods based on the demand curve will be analysed. The examples founded through a literature review have been

integrated with the cases described in a database developed within the Gestire project (2015) with the aim to assess the economic values of the Natura 2000 network in Lombardy region (North of Italy).

Table 1

Trends on the provision of forest ecosystem services affected by climate change

Forest Ecosystem Services	ES category	forest ES sub- category	Boreal	Temperate Oceanic	Temperate Continental	Medi-terranean	Alpine
Provisioning services	Bioenergy production				▼	↕	▼
	Timber production		▲	↕	▼	↕	↕
	Non-wood forest products		▲		▼		■
Regulating Services	Climate regulation	forests carbon stocks	▼	▼	▼	↕	↕
		Soil carbon stocks	▲			↕	▼
		Albedo	▼				
	Pest control		▼	▼	▼	▼	▼
	Natural hazard regulation	Forest fires/ wildfires				▼	▼
		Erosion, avalanche, landslide					▼
		Flooding					▼
	Water quality regulation		▼	▼	▼	▼	▼
	Biodiversity		▲	▲	↕	▼	▼
Cultural Services	Recreation (fishing, nature enjoyment)	Hunting					
		NWFP picking					
	Tourism (skiing)						▼
	Aesthetic / heritage (landscape character, cultural landscapes)						▼

	TREND	CONFIDENCE LEVEL
▲	increasing	well established
▲		established but incomplete
■	stable	established but incomplete
▼	decreasing	established but incomplete
▼		well established
↕	mixed	unresolved
	NA	not enough data

Source: compiled by the authors based on: Allen *et al.* (2010); Beniston (2003); Courbaud *et al.* (2011); Cudlín *et al.* (2017); De Wit *et al.* (2006); Dupire *et al.* (2017); Fernández-Martínez and Fleck (2016); Feurdean *et al.* (2016); Fleischer *et al.* (2017); Forsius *et al.* (2013); Friedrichs *et al.* (2009); Galiano *et al.* (2010); Hartl-Meier *et al.* (2014); Horák (2014); Jolly *et al.* (2005); Kozlov *et al.* (2013); Krupková *et al.* (2018); Kullman (1996); Lebourgeois *et al.* (2010); Linares and Tiscar (2011); Meining *et al.* (2004); Panayotov *et al.* (2016); Prietzel and Christophel (2014); Rogora *et al.* (2018); Saccone *et al.* (2009); Sarris *et al.* (2014); Scarascia-Mugnozza (2010); Tømmervik *et al.* (2009); Vacek *et al.* (2017)

Table 2

Forest ecosystem services and related economic evaluation approaches

Ecosystem Services			Market Value Analysis						Demand Curve Approaches			
Section	ES category	ES sub-category	Benefit as a Proxy			Cost as a Proxy			Indirect Methods		Direct Methods	
			Opportunity Costs	Production Function	Replacement Costs	Cost of Substitute Goods	Defensive expenditures	Damage and Insurance costs	Hedonic Pricing	Travel Cost Method	Contingent Valuation	Choice Modelling
Provisioning	Bioenergy production		x		x	x					x	x
	Timber production		x		x	x					x	x
	Non-wood forest products		x		x	x					x	x
Regulating		Forests carbon stocks	x	x	x		x	x			x	x
		Soil carbon stocks	x	x	x		x	x			x	x
		Albedo	x		x		x	x			x	x
	Pest control		x	x	x		x	x			x	x
		Forest fires/wildfires	x	x	x	x	x	x			x	x
		Erosion, avalanche, landslide	x	x	x	x	x	x	x		x	x
		Flooding	x	x	x	x	x	x			x	x
		Water quality regulation	x	x	x		x	x			x	x
		Biodiversity	x	x	x		x	x			x	x
		Recreation (hunting, nature enjoyment)	x		x	x			x	x	x	x
Cultural	Tourism		x		x	x				x	x	x
	Aesthetic / heritage (landscape character, cultural landscapes)		x		x	x			x	x	x	x

5.1. Market Value Analysis

This category comprises all the methods that are based on the use of values recorded in the market to carry out direct or indirect estimate of mountain forest ES values. Market prices can be a good signal of the value of some ES being influenced by supply and demand functions, i.e. by the revenue generation capacity, current costs and the preferences of consumers. Compared to the other category of techniques (demand curve approaches) these methods are easier to apply due to the use of already existing values directly assumed from the real market. This is also the reason why the outcomes from the implementation of these methods are considered “hard results”, i.e. connected with real evidence from the market, even if in many cases these results represent an underestimate of the TEV of mountain forests ES.

a) Benefit as a proxy. Within this subcategory two main methods are present: “Opportunity Cost” and “Production Function”.

Opportunity Cost (OC). The OC describes the cost that the land owner has to incur when he/she decides not to change the specific land use or to change his/her economic activities in order to maintain or enhance a particular mountain forest ES. For instance, the OC for a landowner that is involved in the project aimed at enhancing forest biodiversity is represented by the income loss derived as a result of reducing timber harvesting in order to reach the project aim. The amount of income lost can be used to estimate the value of biodiversity protection in that forest. Because the OC strictly depends on the land cover or the activity performed, its value is related to the local situation (Barton et al., 2013). Some examples of OC application are listed below. Extensive application of this methodology is found in decision making processes related to forest conservation, biodiversity protection or carbon sequestration or, on the contrary, to forest exploitation (Hily et al., 2015; Schröter et al., 2014; Seidl et al., 2007; Kniivilä et al., 2002). Similarly, OC approaches have been used to consider land use changes or the provision of different mountain forest ES (e.g. Ruijs et al., 2017). OC has been employed to evaluate different provision of ES in forests changing from a monoculture to a close-to-nature forest management system in order to understand the benefits and costs of such process (Schou et al., 2012).

Production Function (PF). The method is based on the relationship between the selected forest ES and the production of a specific good associated to the market. The forest ES is viewed as input for the provision of goods. In order to be able to use this approach it is necessary to know the existing relation between the forest ES and the provided good. The value of the forest ES is thus associated with the increase of income generated by the improved production system.

The method has been used for the valuation of regulating forest-related ES (see Table 2). Gren et al. (2018) used PF in combination with another technique (Replacement Cost described below) in order to assess the impact of pathogen spread in the capability of carbon dioxide sequestration in forest ecosystems. A good example of the application of this method can be found in Nahuelhual et al. (2007), where PF was selected as suitable methodology for assessing the economic value of water provision in Valdivian forests (Chile).

b) Cost as a proxy

Replacement Cost (RC). In this approach the value of the forest ES is associated with the avoided cost to replace the service in case of its loss. In other words, the value of the benefits associated with a certain forest ES is derived from the cost to replace the same benefit with different service or good. This method has been described by Forest Europe as “*the most realistic method of re-creating non-market benefits*” (<https://foresteurope.org/overview-valuation-approaches-methods>).

Several studies have used this methodology to assess forest ES values. Bianchi et al. (2018) have carried out a literature review on the use of different valuation methodologies to measure the value of protection services against rock falls, avalanches, landslides and for investment in flood protection in the Alps, in which RC proved its effectiveness (Getzner et al., 2017; Häyhä et al., 2015; Notaro and Paletto, 2012). Grilli et al. (2015) have also assessed the values of different forest ES in Italian alpine valley using RC. Gren (2015) applied this methodology for the valuation of carbon sequestration in Sweden and Notaro et al. (2009) – in Italy. A slightly different approach in the implementation of RC can be found in the study of Clinch (2000). In this research RC was implemented in combination with other methodologies (Contingent Valuation and Damage Cost), to evaluate the Irish national forest plantations programmes and assess their negative and positive aspects. The application of the RC has been used in relation to the assessment of water quality and provision.

Cost of Substitute Goods (CSG). The rationale behind this methodology is to relate the value of the ecosystem goods or services to the cost that would be necessary to produce a substitute, also called surrogate fulfilling the same or similar function. Little has been found using such keywords as “*substitute good*”, “*surrogate*” or “*economic valuation*”.

In the paper the method was used as a proxy to estimate the value of the natural capital providing forest ES (Petrosillo et al., 2009). Gret-Regamey et al. (2008) applied CSG method to assess the value of forest ES provided by European Alps. Merlo and Croitoru (2005) in their book used CSG in assessing forest function of Mediterranean forests against landslide and floods.

Defensive Expenditures (DE). This approach associates the value of forest ES with the cost of avoiding and/or reducing the negative environmental impact on the services or with the hypothetical costs of implementation for actions intended for the mitigation/compensation of the consequent damages.

DE was used to quantify the monetary value of flood protection in German riparian forest (Barth and Döll, 2016) and Apennines mountain forest in Italy (Morri et al., 2014). In their paper Snider et al. (2006) used the method to understand if the funds invested by the USA federal government in forest fire prevention were effective. The value associated to the actions that had been implemented for forest fire protection can be used as a *proxi* of the value of the ES under consideration.

Damage and Insurance Costs (DIC). Always related to cost as proxy this approach regards the value of forest ES as the expenses incurred as a result of damage caused by natural hazards or the insurance costs paid out as a result of the occurrence of the insured event.

The application of this method can be found to quantify the value of carbon sequestration in German forests (Wüsteman et al., 2014) and Irish forests (Clinch, 2000). In Pulkrab et al. (2011) this method was used to assess the value of pest control services of forests in Czech Republic. Finally Gren et al. (2009) assessed the damage caused by alien invasive species that can have severe effects on biodiversity in Swedish forests.

5.2. Demand curve approaches

These approaches are used whenever the assessment in market values is not applicable and when relevant non-market prices are influencing the TEV of forest ES. The main idea of this set of approaches is to estimate the value of forest ES through:

- the decisions made by real consumers as revealed from their concrete expenditures (so called “Indirect Methods”), or/and;
- the declared preferences of the real and potential consumers collecting information on their willingness to pay for the ES (so called “Direct Methods”).

c) Indirect Methods

Among the indirect methods based on the revealed preferences of the end users, two main methodologies are used to estimate mountain forest ES.

Hedonic Pricing (HP). This technique assumes that the land prices depend on both the internal characteristics of the good providing an ES and to external factors affecting it. A clear example to explain the method could be made taking into consideration real estate prices. The price of this commodity can change depending on the location of the building because of the different landscape that surrounds it. The value of the ES close to the selected house can be approximated with the higher price of house when compared with a similar building located in another area without the investigated ES. Therefore, the value given to the presence of the forest ES can be calculated as the sum that people agree to pay to live close to it. The same method can be used also to evaluate some specific characteristic of the landscape.

For instance, Austrian Federal Forests commissioned the valuation with a HP technique of the protective functions of forests against landslides, avalanches and rock falls (Getzner et al., 2017). In Croatia the HP method applied to the prices of hotel rooms was used to estimate the touristic value of Mediterranean forest (Marušić et al., 2005). In Switzerland Schlöpfer et al. (2015) have estimated the value of different landscape amenities (comprising forests) analysing the variation in rental prices. Sundelin et al. (2015) thought the analysis of the values of different forest features (such as fragmentation, density, shape, productivity) were able to detect which characteristics of forestland affect the cost of land in Sweden. Outside Europe (in the USA and Canada) HP was also applied to evaluate the impact on cultural ES (touristic and aesthetic services) in forest affected by insect infestation (Price et al., 2010), the cost administered to hunting recreational services (Hussain et al., 2007) and the cost of erosion control function of forests in Ohio (Hitzhusen, 1999).

Travel Cost Method (TC). In the method the cost of travel that people pay to reach and visit a certain habitat/ecosystem is elaborated in order to derive the willingness to pay for a specific forest ES or a combination of ES. Generally, TC is used to estimate the value of cultural ES, specifically the ones related to tourism and recreation. In applying TC also the opportunity cost of time is considered.

There are numerous applications of the TC in the assessment of mountain forest ES. In Germany TC has been used to estimate the value of cultural ecosystem services (recreation) provided by German protected areas (Mayer et al., 2018). TC was also used to estimate the potential recreational value of Tatras National park (Jadudová et al., 2017). With the same aim the method was applied by Ezebilo (2016) in the UK, by Melichar (2014) in Czech Republic and by Jozef (2010) in Slovakia. Moran et al. (2006) carried out a more detailed TC analysis assessing the cultural services of Scottish forests considering the cost of mountain biking as a recreational activity. In two cases in the Rocky Mountains in Colorado (United States) TC was used to assess the impact of forest fire on the recreational ES (Loomis et al., 2001) and the effects of tree density – influenced also by insect pests and other hazards – on recreational demand and services (Walsh et al., 1989).

d) Direct Methods

Unlike indirect methods direct methods collect the feedback from end users on their willingness to pay for a certain forest ES. These techniques in fact use tools as questionnaires and surveys asking the opinion of individuals directly.

Contingent Valuation (CV). This approach is aimed at measuring the willingness to accept the loss of a certain ES if no actions for its provision or enhancement are implemented or there is no

willingness to pay by the end users for the implementation of the same action to support the provision of ES. A representative sample that directly or indirectly take advantage of the presence of some ES have been interviewed to collect information on their readiness to accept the loss or willingness to pay under different scenarios.

In order to understand the value of forest recreational services, CV has been used in an Italian alpine valley (Grilli et al., 2014), in Slovakia mountains (Jozef and Miroslav, 2010) and in British woodlands (Christhe et al., 2007). In the Appalachian Mountains it has been used to value the health protection function of forest ecosystems (Holmes and Kramer, 1996). In the study by Bastian et al. (2017) CV was one of the methodologies used to assess the value of forest ES provided by the Eastern Ore Mountains (Germany and Czech Republic). In Italy it has been used also to evaluate the aesthetic services of the national forest landscape (Tempesta and Marangon, 2004).

Choice Modelling (CM). In CM consumers' willingness to pay is detected by asking them to choose from a variety of alternatives. The alternatives are characterized by different attributes of the ES under investigation. One of these attributes is the amount of money people would be willing to pay for the provision of the ES (and its attributes). The survey is designed to reveal the value given to the attributes and to their combinations. The assumption under this approach is that forest ES can be subdivided in different attributes. Because of its features this technique is universal and can be applied to all forest ES.

Some examples of its application can be found mainly regarding the valuation of different attributes of single ES. For instance CM has been applied in valuing recreation services and biological impacts (e.g. bark beetle attack) (e.g. Arnberger et al., 2018; De Valck et al., 2014; Christie et al., 2007; Horne et al., 2005) and in the assessment of biodiversity value carried out by different stakeholders (e.g. Czajkowski et al., 2017; Hoyos et al., 2012; Czajkowski et al., 2009; Meyerhoff et al., 2009; Horne, 2006). It has been also applied to the assessment of heritage values (particularly referring to the landscape characters, e.g. Garrod et al., 2009) and to evaluating different forest ES (e.g. Gatto et al., 2014; Giergiczny et al., 2015).

6. Conclusion

A large variety of studies can be found in scientific literature about CC and its impacts on forest ecosystems, but still some contribution has to be made to the analysis of how different forest ES are affected by the global warming. In fact our results founded a lack of information regarding the impacts of CC on the provision of some forest ES such as cultural ES and specific regulating services "natural hazard regulation" (see Table 1). Because of high environmental and climatic variability of mountain regions it would be necessary to rely on good quality and quantity of primary data in order to be able to have a comprehensive understanding of the whole phenomenon under discussion. For these reasons there is the necessity to sustain the studies on CC impacts on tree physiology and stand structures integrating ES approach.

Changes in the provision of forest ES significantly influencing human livelihood mainly in mountain areas where the interdependence between human and forest ecosystem is stronger and more exposed to the changing climate conditions. Through the literature review several methods to assess the economic value of these goods and services has been detected. The most frequently used methods were the "Demand Curve Approaches". This could be explained by the growing interest to the use of these methodologies which make is possible to assess non-market value of ES. Another explanation could be related to the fact that some methodologies, such as "Production Function" or "Cost of Substitute Good" needed profound knowledge about the interrelation between forest functions and the provision of the ES.

The importance and the necessity to systematise the present information about the economic value of forest ES is the focus of our research interest. The gathered data could be used to fill in the gap in knowledge base in the evaluation of specific ES in particular areas of interest. In fact, using “Benefit Transfer” approach it is possible to analyse the existing evaluation data to estimate the value of the same ES in different contexts. Several databases are already present in the web, such as: EUROFOREX (<https://www.evri.ca/en>), ENVALUE (<https://www.environment.nsw.gov.au/envalueapp/>), RED Database (http://www.isis-it.net/red/start_search.asp), that one reported by El-sasser et al. (2016) and the results of EC-financed research projects (<http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies.htm>).

The outlined methodologies can be used to gather the Total Economic Value of mountain forest ES in order to create a baseline that could be used in future to assess how the value of ES will be modified depending on climatic changes.

References

1. Allen, C.D. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C.D. Allen, A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, N. Cobb // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – № 259(4). – P. 660–684.
2. Arnberger, A. Visitor Preferences for Visual Changes in Bark Beetle-Impacted Forest Recreation Settings in the United States and Germany / A. Arnberger, M. Ebenberger, I.E. Schneider, S. Cottrell, A.C. Schlueter, E. von Ruschkowski, P.H. Gobster // *Environmental Management*. – 2018. – № 61(2). – P. 209–223.
3. Barth, N.C. Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach / N.C. Barth, P. Döll // *Ecosystem Services*. – 2016. – № 21. – P. 39–52.
4. Barton, D. Conservation policy instruments / D. Barton, P. Bernasconi, S. Blumentrath, R. Brouwer, F. Oosterhuis, R. Pinto, D.E. Tobar - 2013.
5. Bastian, O. Ecosystem services of characteristic biotope types in the Ore Mountains (Germany/Czech Republic) / O. Bastian, R. Syrbe, J. Slavik, J. Moravec, J. Louda, B. Kochan, A. Beren // *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*. – 2017. – № 13(1). – P. 51–71.
6. Battisti, A. Climate Change and Insect Pest Distribution Range. Climate Change and Insect Pests / A. Battisti, S. Larsson // *CABI Climate Change Series*. – 2015. – № 7(2009). – P. 1–15.
7. Beniston, M. Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts / M. Beniston // *Climatic Change*. – 2003. – № 59. – P. 5–31.
8. Bianchi, E. The Economic Evaluation of Forest Protection Service Against Rockfall: A Review of Experiences and Approaches / E. Bianchi, C. Accastello, D. Trappmann, S. Blanc, F. Brun // *Ecological Economics*. – 2018. – № 154. – P. 409–418.
9. Briner, S. Trade-offs between ecosystem services in a mountain region / S. Briner, R. Huber, P. Bebi, C. Elkin, D.R. Schmatz, A. Grêt-Regamey // *Ecology and Society*. – 2013. – № 18(3).
10. Brockerhoff, E.G. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services / E.G. Brockerhoff, L. Barbaro, B. Castagnyrol, D.I. Forrester, B. Gardiner, J.R. González-Olabarria, H. Jactel // *Biodiversity and Conservation*. – 2017. – № 26(13). – P. 3005–3035.
11. Christie, M. Valuing enhancements to forest recreation using choice experiment and contingent behaviour methods / M. Christie, N. Hanley, S. Hynes // *Journal of Forest Economics*. – 2007. – № 13(2–3). – P. 75–102.
12. Clinch, J.P. Assessing the social efficiency of temperate-zone commercial forestry programmes: Ireland as a case study / J.P. Clinch // *Forest Policy and Economics*. 2000. – № 1(3–4). – P. 225–241.
13. Courbaud, B. What is the future of the ecosystem services of the Alpine forest against a backdrop of climate change? / B. Courbaud, G. Kunstler, X. Morin, T. Cordonnier // *Revue de Géographie Alpine*. – 2011. – № (98–4). – P. 0–12.
14. Cudlín, P. Drivers of treeline shift in different European mountains / P. Cudlín, M. Klopčič, R. Tognetti, F. Mališ, C.L. Alados, P. Bebi, F.E. Wielgolaski // *Climate Research*. – 2017. – № 73(1–2). – P. 135–150.
15. Czajkowski, M. Spatial Heterogeneity of Willingness to Pay for Forest Management / M. Czajkowski, W. Budziński, D. Campbell, M. Giergiczny, N. Hanley // *Environmental and Resource Economics*. – 2017. – № 68(3). – P. 705–727.
16. Czajkowski, M. Valuing changes in forest biodiversity / M. Czajkowski, M. Buszko-Briggs, N. Hanley // *Ecological Economics*. – 2009. – № 68(12). – P. 2910–2917.
17. De Valck, J. Benefits of clearing forest plantations to restore nature? Evidence from a discrete choice experiment in Flanders, Belgium. / J. De Valck, P. Vlaeminck, S. Broekx, I. Liekens, J. Aertsens, W. Chen, L. Vranken // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – № 125. – P. 65–75.
18. De Wit, H.A. A carbon budget of forest biomass and soils in southeast Norway calculated using a widely applicable method / H.A. De Wit, T. Palosuo, G. Hylen, J. Liski // *Forest Ecology and Management*. – 2006. – № 225. – P. 15–26.
19. Ding, H. Valuing climate change impacts on European forest ecosystems / H. Ding, A. Chiabai, S. Silvestri, P.A.L.D. Nunes // *Ecosystem Services*. – 2016. – № 18. – P. 141–153.

20. Dupire, S. Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps / S. Dupire, T. Curt, S. Bigot // *Science of the Total Environment*. – 2017. – № 595. – P. 801–817.
21. EEA. 10 messages for 2010 // *Mountain ecosystems*. – 2010. – № 11.
22. EFI. Impacts of Climate Change on Forests: Options for Adaptation // *Forestry and Climate Change*. – 2008. – № 119.
23. Elsasser, P. An updated Bibliography and Database on Forest Ecosystem Service Valuation Studies in Austria, Germany and Switzerland / P. Elsasser, J. Meyerhoff, P. Weller // Hamburg: Thuenen Institute. – 2016. – Thuenen Working Paper 65.
24. Ezebilo, E.E. Economic value of a non-market ecosystem service: an application of the travel cost method to nature recreation in Sweden / E.E. Ezebilo // *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*. – 2016. – № 12(4). – P. 314–327.
25. Fernández-Martínez, J. Photosynthetic limitation of several representative subalpine species in the Catalan Pyrenees in summer / J. Fernández-Martínez, I. Fleck // *Plant Biology (Stuttgart, Germany)*. – 2016. – № 18(4). – Pp.638–648.
26. Feurdean, A. Tree and timberline shifts in the northern Romanian Carpathians during the Holocene and the responses to environmental changes / A. Feurdean, M. Gałka, I. Tanțău, A. Geantă, S.M. Hutchinson, T. Hickler // *Quaternary Science Reviews*. – 2016. – № 134. P. 100–113.
27. Fleischer, P. Forest ecosystem services affected by natural disturbances, climate and land-use changes in the Tatra Mountains / P. Fleischer, V. Pichler, P.F. Jr, L. Holko, F. Máliš, E. Gömöryová, P. Hlavá // *Climate Research*. – 2017. – № 73. – P. 57–71.
28. Forsius, M. Impacts and adaptation options of climate change on ecosystem services in Finland: A model based study / M. Forsius, S. Anttila, L. Arvola, I. Bergström, H. Hakola, H.I. Heikkinen, J. Vuorenmaa // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. – 2013. – № 5(1). – P. 26–40.
29. Friedrichs, D.A. Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany / D.A. Friedrichs, V. Trouet, U. Büntgen, D.C. Frank, J. Esper, B. Neuwirth, J. Löffler // *Trees Structure and Function*. – 2009. – № 23(4). – Pp.729–739.
30. Fyllas, N.M. Tree growth-climate relationships in a forest-plot network on Mediterranean mountains / N.M. Fyllas, A. Christopoulou, A. Galanidis, C.Z. Michelaki, P.G. Dimitrakopoulos, P.Z. Fulé, M. Arianoutsou // *Science of the Total Environment*. – 2017. – № 598. – P. 393–403.
31. Galiano, L. Drought-Induced Multifactor Decline of Scots Pine in the Pyrenees and Potential Vegetation Change by the Expansion of Co-occurring Oak Species / L. Galiano, J. Martínez-Vilalta, F. Lloret // *Ecosystems*. – 2010. – № 13(7). – P. 978–991.
32. Garrod, G. Assessing the value of forest landscapes: A choice experiment approach / G. Garrod, E. Ruto, P. Snowdon // *Arboricultural Journal*. – 2009. – № 32(3). – P. 189–211.
33. Gatto, P. Risk profile of patients with hypertensive crisis and acute stroke from Bulgarian urban in-hospital population / P. Gatto, E. Vidale, S. Laura, D. Pettenella // *Bio-Based and Applied Economics*. – 2014. – № 3(1). – Pp.21–43.
34. GESTIRE Project. Stima del valore socio-economico della rete Natura 2000 in Lombardia. Azione A5. Rapporto finale. – 2015 - GESTIRE LIFE11/NAT/IT044.
35. Getzner, M. Gravitational natural hazards: Valuing the protective function of Alpine forests / M. Getzner, G. Gutheil-Knopp-Kirchwald, E. Kreimer, H. Kirchmeir, M. Huber // *Forest Policy and Economics*. – 2017. – № 80. – P. 150–159.
36. Giergiczny, M. Choice experiment assessment of public preferences for forest structural attributes / M. Giergiczny, M. Czajkowski, T. Zylicz, P. Angelstam // *Ecological Economics*. – 2015. – № 119(30). – P. 8–23.
37. Gren, I.M. Estimating values of carbon sequestration and nutrient recycling in forests: An application to the Stockholm-Mälars region in Sweden / I.M. Gren // *Forests*. – 2015. – № 6(10). – P. 3594–3613.
38. Gren, I.M. Forest carbon sequestration, pathogens and the costs of the EU's 2050 climate targets / I.M. Gren, A. Aklilu, K. Elofsson // *Forests*. – 2018. – № 9(9).
39. Gren, I.M. Costs of alien invasive species in Sweden / I.M. Gren, L. Isacs, M. Carlsson // *Ambio*. – 2009. – № 38(3). – P. 135–140.
40. Gret-Regamey, A. Valuing ecosystem services for sustainable landscape planning in Alpine regions / A. Gret-Regamey, A. Walz, P. Bebi // *Mountain Research and Development*. – 2008. – № 28(2). – P. 156–165.
41. Grêt-Regamey, A. Facing uncertainty in ecosystem services-based resource management / A. Grêt-Regamey, S.H. Brunner, J. Altwegg, P. Bebi // *Journal of Environmental Management*. – 2013. – № 127. – P. S145–S154.
42. Grilli, G. Stakeholders' preferences and economic value of forest ecosystem services: An example in the Italian alps / G. Grilli, N. Nikodinoska, A. Paletto, I. De Meo // *Baltic Forestry*. – 2015. – № 21(2). – P. 298–307.
43. Grilli, G. Economic valuation of forest recreation in an alpine valley / G. Grilli, A. Paletto, I. De Meo // *Baltic Forestry*. 2014. – № 20(1). – P. 167–175.
44. Haines-Young, R. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure / R. Haines-Young, M.B. Potschin. 2018. – Available from www.cices.eu.
45. Hartl-Meier, C. Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest / C. Hartl-Meier, C. Zang, U. Büntgen, J. Esper, A. Rothe, A. Göttlein, K. Treydte // *Tree Physiology*. 2014. – № 35(1). – P. 4–15.
46. Häyhä, T. Assessing, valuing, and mapping ecosystem services in Alpine forests / T. Häyhä, P.P. Franzese, A. Paletto, B.D. Fath // *Ecosystem Services*. – 2015. – № 14. – P. 12–23.
47. Hily, E. Assessing the cost-effectiveness of a biodiversity conservation policy: A bio-econometric analysis of Natura 2000 contracts in forest / E. Hily, S. Garcia, A. Stenger, G. Tu // *Ecological Economics*. – 2015. – № 119. – P. 197–208.

48. Hitzhusen, F. J. A resource economic perspective on erosion control for non-economists. Investing in the protection of our environment / F.J. Hitzhusen, // Proceedings of conference 30. – Nashville, 1999. – International Erosion Control Association.
49. Holmes, T.P. Contingent valuation of ecosystem health / T.P. Holmes, R.A. Kramer // *Ecosystem Health*. – 1996. – № 2(1). – P. 58–60.
50. Horák, R. Drought Impact on Forest Trees in Four Nature Protected Areas in Serbia / R. Horák, M. Borisev, A. Pilipovic, S. Orlovic, S. Pajevic, N. Nikolic // *Sumarski List*. – 2014. – № 116(5–6). – P. 301–308.
51. Horne, P. Forest owners' acceptance of incentive based policy instruments in forest biodiversity conservation: a choice experiment based approach / P. Horne // *Silva Fennica Monographs*. – 2006. – № 40.
52. Horne, P. Multiple-use management of forest recreation sites: A spatially explicit choice experiment / P. Horne, P.C. Boxall, W.L. Adamowicz // *Forest Ecology and Management*. – 2005. – № 207(1–2 SPEC.). P. 189–199.
53. Hoyos, D. Valuing a Natura 2000 network site to inform land use options using a discrete choice experiment: An illustration from the Basque Country / D. Hoyos, P. Mariel, U. Pascual, I. Etxano // *Journal of Forest Economics*. – 2012. – № 18(4). – P. 329–344.
54. Hussain, A. Hedonic analysis of hunting lease revenue and landowner willingness to provide fee-access hunting / A. Hussain, I.A. Munn, S.C. Grado, B.C. West, W.D. Jones, J. Jones // *Forest Science*. – 2007. – № 53(4). – P. 493–506.
55. IPBES. Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services / M. Fischer, M. Rounsevell, A. Torre-Marín, A. Mader, A. Church, M. Elbakidze, V. Elias, T. Hahn, P.A. Harrison, J. Hauck, B. Martín-López, I. Ring, C. Sandström, I. Sousa Pinto, P. Visconti, N.E. Zimmermann, M. Christie // IPBES secretariat, Bonn, Germany - 2018.
56. Jacquet, J. S. Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: A quantitative review / J.S. Jacquet, C. Orazio, H. Jactel // *Annals of Forest Science*. – 2012. – № 69(8). – P. 857–866.
57. Jaďuďová, J. Travel cost method of evaluating cultural ecosystem services. / J. Jaďuďová, R. Kanińska, M. Kizeková, J. Makovíková // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. – 2017. – SGEM № 17. – P. 1043–1050.
58. Jolly, W.M. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps / W.M. Jolly, M. Dobbertin, N.E. Zimmermann, M. Reichstein // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – № 32(18). – P. 1–4.
59. Jozef, T. Possibilities of valuation of recreation in forests | Možnosti hodnotenia rekreačnej funkcie lesov / T. Jozef, K. Miroslav // *In Rekreačné ochrana prírody: zborník príspevkov*. 2010. – P. 73–80.
60. Kniivilä, M. The opportunity costs of forest conservation in a local economy / M. Kniivilä, O. Saastamoinen // *Silva Fennica*. 2002. – № 36(4). – P. 853–865.
61. Kozlov, M.V. Abundance and diversity of birch-feeding leafminers along latitudinal gradients in northern Europe / M.V. Kozlov, E.J. van Nieuwenkerken, V. Zverev, E.L. Zvereva // *Ecography*. – 2013. – № 36(10). – P. 1138–1149.
62. Krupková, L. Impact of water scarcity on spruce and beech forests / L. Krupková, K. Havráňková, J. Krejza, P. Sedlák, M.V. Marek // *Journal of Forestry Research*. – 2018. – P. 1–11.
63. Kullman, L. Rise and demise of cold-climate *Picea abies* forest in Sweden / L. Kullman // *New Phytologist*. – 1996. – № 134(2). – P. 243–256.
64. Kurbanov, E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity / E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2007. – № 22. – P. 488–499.
65. Kurbanov, E.A. Changes in area and carbon in forests of the Middle Zavolgie: a regional case study of Russian forests / E.A. Kurbanov, W.M. Post // *Climatic change*. – 2002. – № 1-2. – Vol. 55. – P. 157–171.
66. Lebourgeois, F. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*) / F. Lebourgeois, C.B.K. Rathgeber, E. Ulrich // *Journal of Vegetation Science*. – 2010. № 21(2). – P. 364–376.
67. Linares, J.C. Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests / J.C. Linares, J.J. Camarero, J.A. Carreira // *Global Ecology and Biogeography*. – 2009. – № 18(4). – P. 485–497.
68. Linares, J.C. Buffered climate change effects in a Mediterranean pine species: Range limit implications from a tree-ring study / J.C. Linares, P.A. Tiscar // *Oecologia*. – 2011. – № 167(3). – P. 847–859.
69. Lindner, M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems / M. Lindner, M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbati, J. Garcia-Gonzalo, M. Marchetti // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – № 259(4). – P. 698–709.
70. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia / T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. Eds. G. Gutman, R. Volker. – 2017, Springer International Publishing. – P. 173–192.
71. Loomis, J. Testing for Differential Effects of Forest Fires on Hiking and Mountain Biking Demand and Benefits / J. Loomis, A. González-Cabán, J. Englin // *Journal of Agricultural and Resource Economics*. – 2001. 26(2). – P. 508–522.
72. Marušić, Z. The economic value of coastal forests for tourism: A comparative study of three valuation methods / Z. Marušić, S. Horak, S. Navrud // *Tourism*. – 2005. – № 53(2). – P. 141–152.
73. Masiero, M. Valuing forest ecosystem services: A training manual / M. Masiero, D. Pettenella, M. Boscolo, S.K. Barua, I. Animon, R. Matta // *FAO, Rome* [under press].
74. Mayer, M. Assessing and valuing the recreational ecosystem services of Germany's national parks using travel cost models / M. Mayer, M. Woltering // *Ecosystem Services*. – 2018. – № 31. – P. 371–386.

75. Melichar, J. The economic valuation of the change in forest quality in the Jizerske Hory mountains: A contingent behavior model / J. Melichar // In Public Recreation and Landscape Protection - With Man Hand in Hand? 2014 Conference Proceeding. – 2014. – P. 242–248.
76. Meining, S. Waldzustandsbericht 2004 der Forstlichen Versuchs / S. Meining, H. Schro, K. van Wilpert // Forschungsanstalt Baden-Württemberg, report, Forstliche Vers. – in Forsch., Freiburg, Germany. – 2004.
77. Merlo, M. Valuing Mediterranean forests: towards total economic value / L. Merlo, M. Croitoru // Wallingford: CABI Publishing. – 2005.
78. Meyerhoff, J. Benefits of biodiversity enhancement of nature-oriented silviculture: Evidence from two choice experiments in Germany / J. Meyerhoff, U. Liebe, V. Hartje // Journal of Forest Economics. – 2009. – № 15(1–2). – P. 37–58.
79. Moran, D. Estimating the recreational value of mountain biking sites in Scotland using count data models / D. Moran, E. Tresidder, A. McVittie // Tourism Economics. – 2006. – № 12(1). – P. 123–135.
80. Morri, E. A forest ecosystem services evaluation at the river basin scale: Supply and demand between coastal areas and upstream lands (Italy) / E. Morri, F. Pruscini, R. Scolozzi, R. Santolini // Ecological Indicators. – 2014. – № 37 (PART A). – P. 210–219.
81. Nahuelhual, L. Valuing ecosystem services of Chilean temperate rainforests / L. Nahuelhual, P. Donoso, A. Lara, D. Núñez, C. Oyarzún, E. Neira // Environment, Development and Sustainability. – 2007. – № 9(4). – P. 481–499.
82. Notaro, S. The economic valuation of natural hazards in mountain forests: An approach based on the replacement cost method / S. Notaro, A. Paletto // Journal of Forest Economics. – 2012. – № 18(4). – P. 318–328.
83. Notaro, S. Economic impact of forest damage in an alpine environment | Automatizált eljárások törzstérképek előállítására földi lézeres letapogatás alapján / S. Notaro, A. Paletto, R. Raffaelli // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. – 2009. – № 5. – P. 131–143.
84. Panayotov, M. Climate extremes during high competition contribute to mortality in unmanaged self-thinning Norway spruce stands in Bulgaria / M. Panayotov, D. Kulakowski, N. Tsvetanov, F. Krumm, I. Berbeito, P. Bebi // Forest Ecology and Management. 2016. – № 369. – P. 74–88.
85. Pauli, H. Title : Recent Plant Diversity Changes on Europe ' s Mountain Summits / H. Pauli, M. Gottfried, S. Dullinger, O. Abdaladze, J. Luis, B. Alonso, R. Kanka // Science. – 2012. – № 336. – P. 353–355.
86. Petrosillo, I. The effectiveness of different conservation policies on the security of natural capital / I. Petrosillo, N. Zaccarelli, T. Semeraro, G. Zurlini // Landscape and Urban Planning. – 2009. – № 89(1–2). – P. 49–56.
87. Price, J.I. Insect infestation and residential property values: A hedonic analysis of the mountain pine beetle epidemic / J.I. Price, D.W. McCollum, R.P. Berrens // Forest Policy and Economics. – 2010. – № 12(6). – P. 415–422.
88. Prietzel, J. Organic carbon stocks in forest soils of the German alps / J. Prietzel, D. Christophel // Geoderma. – 2014. – № 221–222. – P. 28–39.
89. Pulkrab, K. Optimum costs of forest protection accgreing to ecosite classes | Optimum nákladů na ochranu lesa podle souborů lesních typů / K. Pulkrab, R. Sloup, M. Sloup, J. Bukáček // Zpravy Lesnického Vyzkumu. – 2011. – № 56(SUPPL. PEC). – P. 65–74.
90. Pureswaran, D.S. Forest Insects and Climate Change / D.S. Pureswaran, A. Roques, A. Battisti // Forest Entomology - 2018. – P. 35–50.
91. Rogora, M. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines / M. Rogora, L. Frate, M.L. Carranza, M. Freppaz, A. Stanisci, I. Bertani, G. Matteucci // Science of the Total Environment. – 2018. – № 624. – P. 1429–1442.
92. Ruijs, A. Opportunity Cost Estimation of Ecosystem Services / A. Ruijs, M. Kortelainen, A. Wossink, C.J.E. Schulp, R. Alkemade // Environmental and Resource Economics. – 2017. – № 66.
93. Saccone, P. The role of biotic interactions in altering tree seedling responses to an extreme climatic event / P. Saccone, S. Delzon, P. Jean-Philippe, J.J. Brun, R. Michalet // Journal of Vegetation Science. – 2009. – № 20(3). – P. 403–414.
94. Sarris, D. Increasing extremes of heat and drought associated with recent severe wildfires in southern Greece / D. Sarris, A. Christopoulou, E. Angelonidi, N. Koutsias, P.Z. Fulé, M. Arianoutsou // Regional Environmental Change. – 2014. – № 14(3). – P. 1257–1268.
95. Scarascia-Mugnozza, G. Water balance and forest productivity in mediterranean mountain environments / G. Scarascia-Mugnozza, G. Callegari, A. Veltri, G. Matteucci // Italian Journal of Agronomy. – 2010. – № 5(2). – P. 217–222.
96. Schläpfer, F. Valuation of landscape amenities: A hedonic pricing analysis of housing rents in urban, suburban and periurban Switzerland / F. Schläpfer, F. Waltert, L. Segura, F. Kienast // Landscape and Urban Planning. – 2015. – № 141. – P. 24–40.
97. Schou, E. An economic evaluation of strategies for transforming even-aged into near-natural forestry in a conifer-dominated forest in Denmark / E. Schou, J.B. Jacobsen, K.L. Kristensen // Forest Policy and Economics. – 2012. – № 20. – P. 89–98.
98. Schröter, M. Ecosystem services and opportunity costs shift spatial priorities for conserving forest biodiversity / M. Schröter, G.M. Rusch, D.N. Barton, S. Blumentrath, B. Nordén // PLoS ONE. – 2014. – № 9(11).
99. Seidl, R. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria / R. Seidl, W. Rammer, D. Jäger, W.S. Currie, M.J. Lexer // Forest Ecology and Management. – 2007. – № 248(1–2). – P. 64–79.
100. Snider, G. The irrationality of continued fire suppression: An avoided cost analysis of fire hazard reduction treatments versus no treatment / G. Snider, P.J. Daugherty, D.B. Wood // Journal of Forestry. – 2006. – № 104(8). – P. 431–437.

101. Sundelin, T. Determinants of the market price of forest estates: a statistical analysis / T. Sundelin, J. Högborg, L. Lönnstedt // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2015. – № 30(6). – P. 547–557.
102. Tempesta, T. The total economic value of Italian forest landscape / T. Tempesta, F. Marangon // MIUR – PRIN 2003 Project. "Landscape and Environmental Actions within the Regional Rural Development Policies". – 2004.
103. Thorsen, B.J. The Provision of Forest Ecosystem Services / B.J. Thorsen, R. Mavsar, L. Tyrväinen, P. Irina, S. Anne // *Quantifying and valuing What Science Can Tell Us*. – 2014. – № 1.
104. Tømmervik, H. Above ground biomass changes in the mountain birch forests and mountain heaths of Finnmarksvidda, northern Norway, in the period 1957–2006. / H. Tømmervik, B. Johansen, J.Å. Riseth, S.R. Karlsen, B. Solberg, K.A. Høgda // *Forest Ecology and Management*. – 2009. – № 257(1). – P. 244–257.
105. Vacek, Z. Effect of fungal pathogens and climatic factors on production, biodiversity and health status of ash mountain forests/ Z. Vacek, S. Vacek, D. Bulušek, V. Podrázský, J. Remeš, J. Král, T. Putalová // *Dendrobiology*. – 2017. – № 77. – P. 161–175.
106. Walsh, R.G. Recreational demand for trees in national forests / R.G. Walsh, F.A. Ward, J.P. Olienyk // *Journal of Environmental Management*. – 1989. – № 28(3). – P. 255–268.
107. Wüstemann, H. Financial costs and benefits of a program of measures to implement a National Strategy on Biological Diversity in Germany / H. Wüstemann, J. Meyerhoff, M. Rühs, A. Schäfer, V. Hartje // *Land Use Policy*. – 2014. – № 36. – P. 307–318.

УДК 528.88

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ СРЕДНЕЙ СИБИРИ ЗА ПЕРИОД 1990–2015 ГГ. ПО ДАННЫМ LANDSAT

Е.Г. Швецов, Е.И. Парфенова, Н.М. Чебакова
Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН

Мониторинг изменений растительного покрова является важным элементом при изучении антропогенных и природных воздействий на окружающую среду и, в частности, при оценке влияния климатических изменений на перемещение растительных зон. Для центральных и южных районов Средней Сибири (Красноярский край, республики Хакасия и Тыва) проведена оценка изменения площадей лесных и нелесных земель на основе архива снимков спутника Landsat за период с 1990 по 2015 годы. Выделение классов лесных и нелесных земель выполнено с использованием преобразования Tasseled Cap и управляемой классификации. Общая точность классификации составила более 90%, что свидетельствует о высокой точности разделения лесных и нелесных территорий. Площадь территории, на которой за период с 1990 по 2015 годы наблюдалось изменение типа растительного покрова, составила более 8% от общей площади района исследования. Площадь участков, где произошла потеря лесного покрова (изменения «лес – нелес»), составила около 26 тыс. км² или 5.2% общей площади района исследования. В то же время лесовосстановление (изменения «не лес – лес») отмечены на территории около 15 тыс. км², что составляет около 3.1% от общей площади. Смена растительности в направлении «лес – не лес» происходила, главным образом, на территории Республики Тыва (на юге области исследования), а также в Приангарье (на севере области исследования) и была связана с воздействием лесных пожаров. Наибольшие площади, на которых регистрировались процессы лесовосстановления, являлись в основном старыми вырубками. В то же время в районах, не затронутых лесными пожарами или вырубками, не выявлено существенных изменений границы между сельскохозяйственными землями и лесами.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Landsat, преобразование Tasseled Cap классификация изображений, растительный покров, Сибирь.

MONITORING OF VEGETATION CHANGES IN THE CENTRAL SIBERIA BETWEEN 1990 AND 2015 USING LANDSAT DATA

E.G. Shvetsov, E.I. Parfenova, N.M. Tchebakova
V.N. Sukachev Institute of Forest FRC, KSC SB RAS

Monitoring of land cover changes is crucial for the study of anthropogenic and natural effects on the environment and, in particular, in assessing the impact of climatic change on the potential

shifts of vegetation zones. For central and southern regions of Central Siberia (the Krasnoyarsk Territory, Khakassia and Tyva Republics), we assessed the changes in area of forest and non-forest lands using the Landsat data from 1990 to 2015. The separation between classes of forest and non-forest lands was performed using the Tasseled Cap transformation and supervised classification. The overall classification accuracy was more than 90%, which indicates a high reliability of forest and non-forest area validation. The area of the territory where vegetation cover changed between 1990 and 2015 was about 8% of the total area of the study area. An area of about 26 thousand km² or 5.2% of the study area experienced loss of forest cover (changes in "forest – non forest" direction). At the same time, reforestation (changes in "non forest - forest" direction) was observed on about 15 thousand km², which is about 3.1% of the total study area. The change of vegetation in the forest-non forest direction occurred mainly in the Republic of Tuva (in the south of the study area), as well as in the Angara region (in the north of the study area) and was likely associated with the impact of forest fires. The largest areas on which the reforestation processes were recorded were mainly old logging sites. At the same time, in areas not affected by forest fires or logging, there has been no significant shifts between non-forest and forest lands.

Keywords: remote sensing, Landsat, Tasseled cap transformation, image classification, land cover, Siberia.

Введение. Результаты исследований изменения климата указывают на значительное наблюдаемое и прогнозируемое повышение температур на территории Сибири (МГЭИК, 2007; IPCC, 2013). В связи с климатическими изменениями прогнозируется перемещение лесных биомов (Soja et al., 2007). К концу века прогнозируется полная перестройка растительных зон, связанная с перемещением таежных лесов в северо-восточном направлении. В то же время предполагается, что на большей части территории Сибири будут преобладать степные и лесостепные экосистемы (Tchebakova et al., 2011). В частности, прогнозируется, что расширение площади степей будет происходить в южных районах центральной Сибири (республики Тыва и Хакассия) (Tchebakova et al., 2011).

Мониторинг пространственной и временной динамики растительного покрова является важной задачей при оценке последствий антропогенных и природных воздействий на окружающую среду. Информация о состоянии растительного покрова и его изменениях необходима для решения ряда научных проблем: глобальный цикл углерода, водный баланс, влияние изменений климата на растительность (Wang et al., 2006; Усольцев, 2007; МГЭИК, 2007; Loboda et al., 2017).

В настоящее время технологии дистанционного зондирования широко используются при решении задач мониторинга в сельском хозяйстве, управлении водными ресурсами и лесами (Барталёв и др., 2011; Friedl et al., 2002; Hansen et al., 2013; Boucher et al., 2018). В число наиболее важных задач входит обнаружение изменений растительного покрова, включая классификацию территории на лесные и нелесные участки, а также мониторинг перемещения границы между этими классами. Исследования в данной области ведутся для различных регионов уже на протяжении длительного времени (Cingolani et al., 2004; Vittek et al., 2014; Курбанов и др., 2016).

В процессе решения задач мониторинга растительного покрова используются данные космических систем, имеющих как низкое (AVHRR, MODIS), так и среднее / высокое пространственное разрешение (Landsat, Sentinel-2, Канопус-В) (Loveland et al., 2000; Friedl et al., 2002; Барталёв и др., 2011; Hansen et al., 2013; Курбанов, 2016; Швецов и др., 2016; Воробьев, Курбанов, 2017; Belgiu, Csillik, 2018). В частности, снимки Landsat, архив которых включает наблюдения уже за 40 лет, длительное время используются в качестве одного из основных источников данных в задачах картирования растительности (Курбанов и др., 2014).

При оценке и мониторинге изменений в растительном покрове находят применение различные методы анализа спутниковых изображений: вегетационные индексы, трансформация Tasseled Cap («Колпачок с кисточкой»), методы управляемой и неуправляемой классификации, анализ спектральной смеси (Spectral Mixture Analysis), а также сочетания этих методов (Gitas et al., 2012; Курбанов и др., 2015).

Основной целью данной работы было оценить текущие изменения площадей лесных и лесных земель по спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения (Landsat) на территории Средней Сибири за последнюю четверть века (с 1990 по 2015 гг.). Для этого был сформулирован ряд задач: 1) оценить разделимость участков, соответствующих классам «лес» и «не лес» по данным Landsat; 2) создать карты лесных и не лесных территорий по состоянию на 1990 и 2015 годы; 3) построить итоговую карту, соответствующую изменениям растительного покрова.

Исходные данные и методы. Область исследования включала центральные и южные районы Красноярского края, а также республики Хакасия и Тыва, охватывая территорию от 50° до 58° с.ш. и от 88° до 99° в.д. (рис. 1). Её общая площадь составила около 500 тыс. км², включая три лесорастительные зоны: таежная, лесостепная, а также южно-сибирская горная зона (Приказ ..., 2014). Согласно картам растительного покрова (Friedl et al., 2002; Bartalev et al., 2003) площадь лесных земель составляет около 67%.

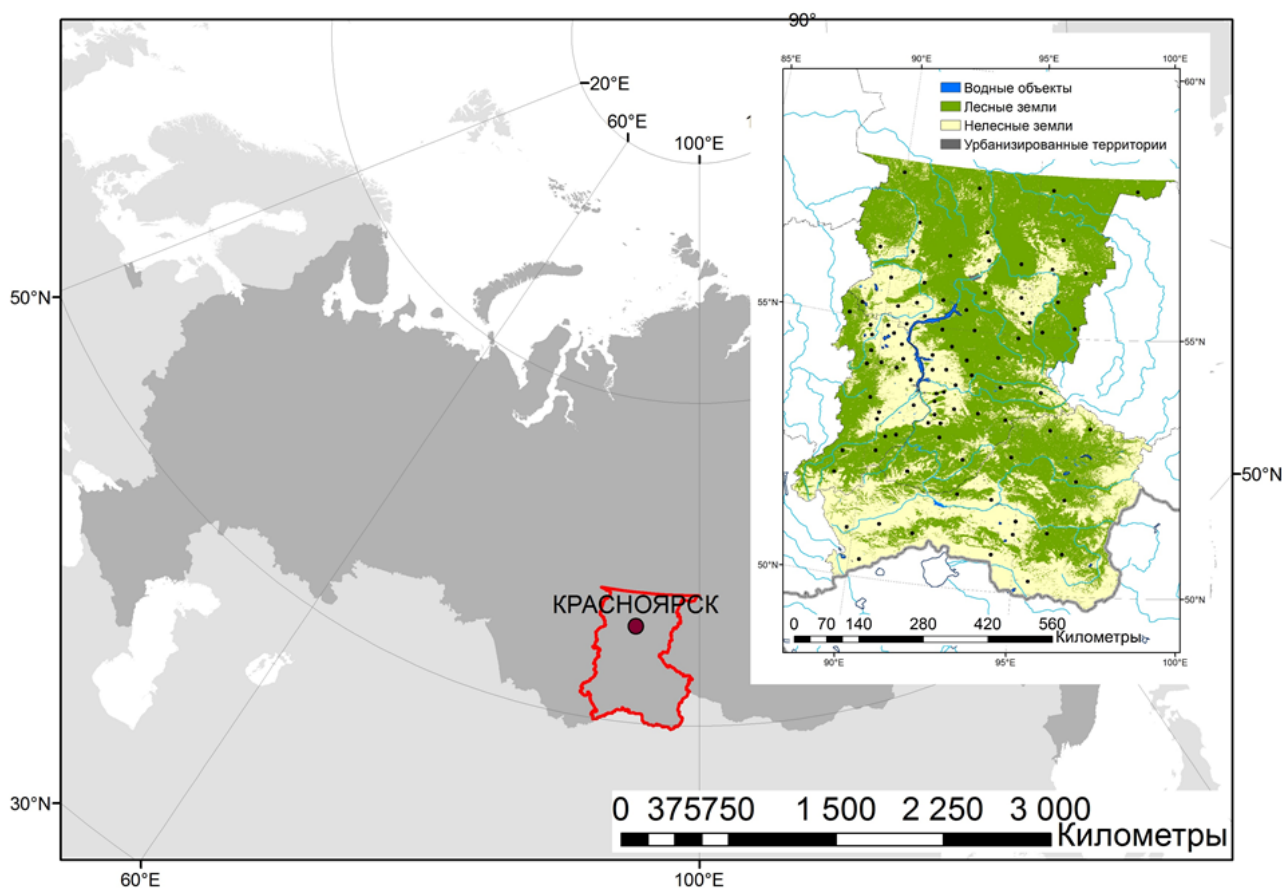


Рис. 1. Расположение области исследования. На вставке показаны лесные и не лесные земли согласно карте растительного покрова MODIS Collection 5 global land cover (Friedl et al., 2002). Черными точками отмечено расположение эталонов, использованных в процессе классификации

В работе использовались спутниковые данные среднего пространственного разрешения (30 м), полученные со спутников Landsat и находящиеся в открытом доступе. Источником спутниковых снимков для данной работы являлись архивы Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS), доступ к которым осуществляется через интерфейс

Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Для оценки распределения лесной и нелесной растительности, соответствующего 1990 году, применялись снимки со спутников Landsat 4 и Landsat 5, полученные в период с 1988 по 1992 год, обеспечивающие полное покрытие области исследования. Итоговое распределение растительности по состоянию на 2015 год выполнялось по данным спутника Landsat 8 за период с 2013 по 2017 год. Для дальнейшего анализа выбирались снимки, доля площади облачного покрова на которых составляла не более 15%. Также из дальнейшей обработки исключались снимки, содержащие значительное количество дымки, по результатам визуального анализа. При выборе исходных данных предпочтение отдавалось тем снимкам, даты получения которых были ближе к «опорным» годам: 1990 и 2015. Всего было использовано 78 снимков, полученных с мая по сентябрь.

К снимкам Landsat уровня 1, загружаемым из архивов Геологической службы США, уже применена геометрическая коррекция, и они переведены в проекцию UTM (Universal Transverse Mercator) (<https://landsat.usgs.gov/landsat-processing-details>). Однако для формирования обучающих выборок и применения к данным алгоритмов классификации тоже необходимо проведение радиометрической коррекции, а также исключение частей снимков, содержащих облака и тени от облаков (Song et al., 2001; Coppin et al., 2004). Первым этапом являлась калибровка цифровых отсчетов (Digital Numbers, DN), содержащихся в данных Landsat уровня 1, в значения спектральной отражательной способности и температуры на уровне сенсора (Chander et al., 2009). После этого к откалиброванным данным были применены методики маскирования облаков и их теней, а также атмосферной коррекции (Bodard et al., 2011; Zhu and Woodcock, 2012).

Полученные значения спектральной отражательной способности использовались для выполнения трансформации изображения по методу Tasseled Cap («Колпачок с кисточкой») (Kauth and Thomas, 1976). Данный подход широко применяется в задачах оценки динамики растительности и нарушенности лесов, решаемых с помощью данных ДЗЗ (Healey et al., 2005; Liu et al., 2014). Трансформация Tasseled Cap фактически является методом преобразования спектральных данных в новый набор каналов, связанных с характеристиками сцены. Эта трансформация первоначально была разработана для использования с данными сканера Landsat/MSS, а позднее её коэффициенты были адаптированы для применения с более поздними сенсорами (Crist and Cicone, 1984; Baig et al., 2014). Таким образом, в результате для каждого снимка Landsat был получен трехканальный растр, содержащий компоненты трансформации Tasseled cap: «яркость» (brightness), «зеленость» (greenness) и «влажность» (wetness).

Для формирования обучающей выборки, необходимой для процедуры классификации, использовались карты типов растительности (Friedl et al., 2002; Bartalev et al., 2003), снимки Landsat, а также спутниковые снимки высокого разрешения, доступные через сервис Google Earth. В результате были выделены участки, классифицированные как лес с преобладанием хвойных вечнозеленых пород, листопадных пород или смешенный лес. Обучающие выборки также были созданы и для нелесных земель – сельскохозяйственных угодий, степей и т.д. Общий объем выборки составил более 90 участков. Каждый из участков имел размер 6 - 10 пикселей Landsat. Наибольшее количество эталонов из обучающей выборки было расположено вблизи границы «лес/не лес» в центральных и южных районах Красноярского края и Республики Хакасия (см. рис. 1).

Для выделения на территории исследования районов, покрытых лесной и не лесной растительностью, применялась автоматическая классификация. В работе использовался алгоритм управляемой классификации (классификация по методу максимального правдоподобия (Richards, 2013), который применялся к слоям растра, содержащего компоненты трансформации Tasseled Cap. В результате на основе полученных эталонов выполнена попиксельная классификация изображений на всю область исследования.

Таким образом, были сформированы два композитных изображения, содержащие результаты классификации, соответствующие двум временным срезам, использованным при анализе. В качестве основных снимков для двух временных срезов применялись снимки, сделанные соответственно в 1990 и 2015 годах. Если на какой-либо район области исследования снимка не находилось, если часть снимка была закрыта облачностью или имела низкое качество, то такой участок заполнялся данными за другие годы.

Для выявления изменений в растительном покрове с помощью геоинформационных систем была рассчитана разность двух изображений. Сформированы основные классы результирующей карты: «лес» и «не лес» – для случаев, когда изменений зафиксировано не было, а также два класса, соответствующих появлению леса и его потере.

Результаты исследования и их обсуждение. Оценка полученной обучающей выборки в пространстве компонентов трансформации Tasseled Cap показала, что в целом эталоны, соответствующие лесным и нелесным типам растительности, демонстрируют хорошую разделимость (рис. 2). В пространстве «яркость-зеленость» лесная растительность характеризуется более высокими значениями компонента «зеленость» (рис. 2а), особенно в случае лесов с преобладанием лиственных пород. Леса с преобладанием хвойных вечнозеленых пород характеризуются более низкими значениями компонента «яркость», что связано с затенением ими почвы (Crist and Cicone, 1984); им соответствует левая нижняя область на диаграмме лесной растительности. Также лесные земли характеризовались заметно более высокими значениями компонента «влажность» (рис. 2б) по сравнению с нелесными.

По результатам классификации были получены карты лесных и нелесных территорий для двух временных срезов, а также разностная карта, отображающая участки, где присутствовало лесовосстановление или, наоборот, исчезновение лесной растительности (рис. 3а). Оценка точности сформированных карт оценивалась по эталонным данным, полученным по спутниковым снимкам высокого пространственного разрешения. Для этого был дополнительно сформирован массив эталонов, состоящий из 45 участков. Участки, использованные для оценки точности классификации, располагались, главным образом, в центре территории исследования, включая как лесные, так и нелесные земли. Достоверность выделения классов «лес/не лес» составила около 90%.

Согласно полученным результатам, общая площадь покрытых лесом земель по состоянию на 1990 год составила около 312 тыс. км², или около 62% территории исследования. Основные массивы лесов находятся

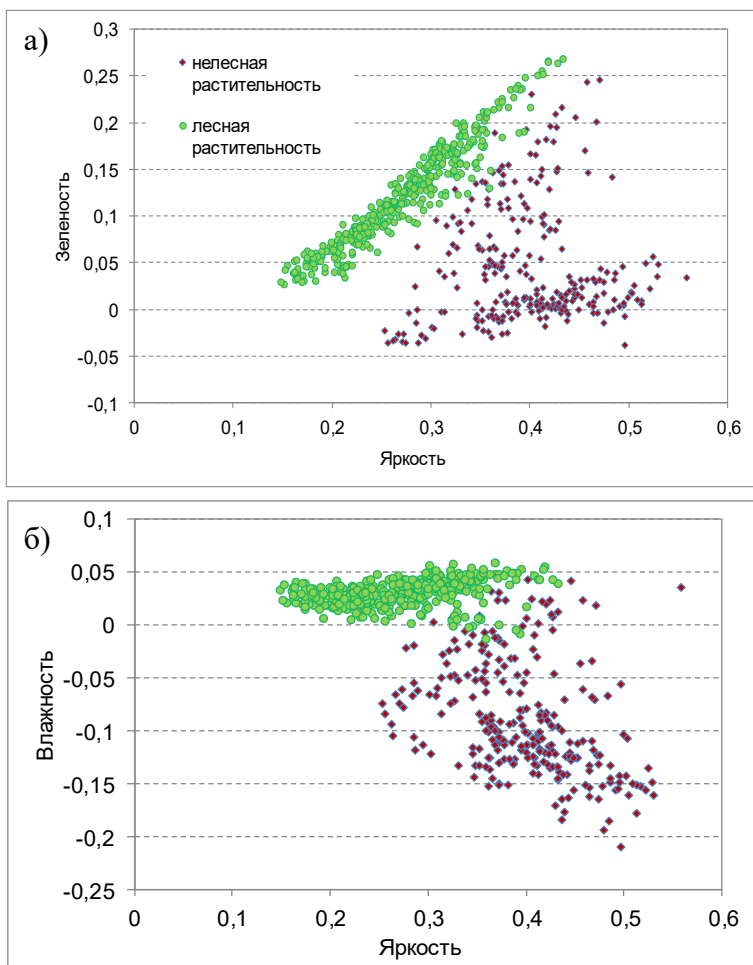


Рис. 2. Оценка разделимости участков, составляющих обучающую выборку, в пространстве компонентов Tasseled Cap: а) компоненты «яркость» и «зеленость»; б) компоненты «яркость» и «влажность»

главным образом в северных и восточных районах области исследования (рис. 3а). Земли сельскохозяйственного назначения расположены в основном в центральных и южных районах Красноярского края.

Суммарная площадь территории, на которой наблюдалось изменение типа растительного покрова, составила более 8% от общей площади района исследования. Площадь участков, где происходили изменения в направлении «лес – не лес», составила 25.7 тыс. км², или 5.2% общей площади. В то же время изменения по типу «не лес – лес» отмечены на территории около 15.3 тыс. км², что составляет около 3.1% от общей площади.

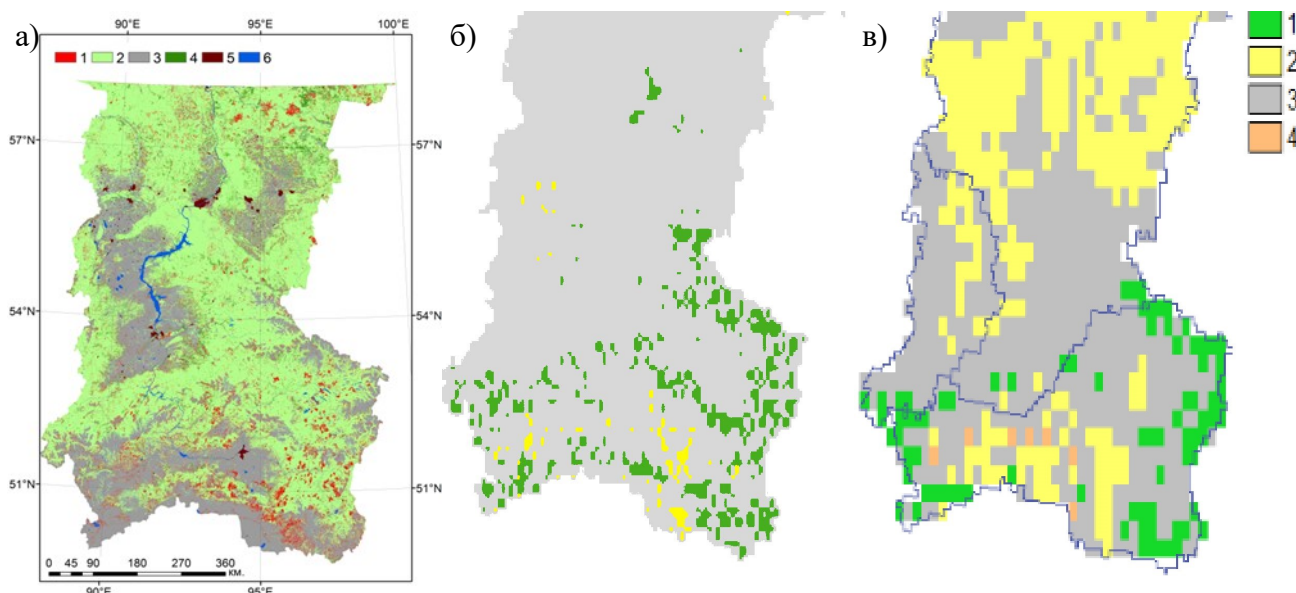


Рис 3. Классы растительного покрова и их изменения в течение 1990-2015 гг.: (а) полученные по космоснимкам и «горячие точки» изменения «лес – не лес», смоделированные (б) по наблюдаемым климатическим данным за 1990-2010 гг. и (в) по 5 наиболее «сухим» моделям СМIP5 (см. текст) изменения климата по жесткому сценарию RCP 8.5 к 2080 г. Обозначения классов на снимке: 1 – переход «лес – не лес», 2 – лесные земли, 3 – нелесные земли, 4 – переход «не лес – лес», 5 – населенные пункты, 6 – водные объекты. На модельных картах: 1 – переход «не лес-лес», 2 – «лес – не лес», 3 – без изменений, 4 – опустынивание

Смена растительности в направлении «лес–не лес» происходила главным образом на территории Республики Тыва (на юге области исследования), а также в Приангарье (на севере области исследования). Сравнение полученной карты изменения типов растительности с картой лесных пожаров показало, что наибольшие площади, на которых произошла гибель лесов, связана с пожарами 2002 года в Республике Тыва и с пожарами 2011, 2012 гг. в районе Приангарья. Однако, как показывают результаты моделирования изменений растительности «лес – не лес» по наблюдаемым климатическим данным за 1990-2010 гг., «горячие точки» перехода лесной растительности в нелесную (рис. 3б), совпадающие с отмеченными на космоснимках в Тыве и Приангарье, говорят о том, что лесорастительные условия для восстановления леса на гарях и вырубках будут неблагоприятными на этих площадях и леса могут быть утрачены при потеплении климата.

Прогнозы изменений растительности «лес - не лес» к концу столетия были получены сопряжением авторской биоклиматической модели сибирской растительности (Tchebakova et al., 2009, 2011) с проекциями изменений климата из 5 наиболее теплых (6-9°C потепления) и «сухих» моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP5 (CanESM2, CCSM4(NCAR), CSIRO-мк3.6.0, HadGEM2-AO, NorESM1-M) по жесткому сценарию изменения климата RCP 8.5 (рис. 3в). Результаты моделирования подтверждают, что будет происходить остепнение (32.5%) и даже опустынивание (в Тувинской котловине ~ 1%) на территории исследований,

около половины площади останется без изменений, и только на 9% возможно облесение, которое, скорее всего, станет происходить в высокогорьях, где будут создаваться благоприятные условия при потеплении климата и обилии осадков.

Помимо пожаров, еще одной значимой причиной потери лесов в северных районах области исследования были вырубки. Наибольшие области, где наблюдалась смена растительности в направлении «нелес – лес», располагались главным образом в центральных и северных районах при достаточном увлажнении. Данные участки являлись в основном старыми вырубками, на которых происходит процесс лесовозобновления. В то же время в районах, не затронутых лесными пожарами или рубками, не наблюдалось значительных перемещений границы между сельскохозяйственными степными землями и лесами.

Заключение. С использованием архивных спутниковых данных Landsat выполнена оценка изменений растительного покрова за период с 1990 по 2015 г. на территории Средней Сибири. Анализ показал, что изменения типа растительного покрова имели место на 8% территории области исследования. При этом на 5% территории регистрировалась смена растительности в направлении «лес – не лес», а за 3% в направлении «не лес – лес». Таким образом, итоговое изменение типов растительности можно охарактеризовать как сокращение площади лесных земель примерно на 10 тыс. км². Основными причинами, приводившими к таким изменениям, являлись рубки и пожары. Это подтверждает тот факт, что пожары способствуют переходу лесных земель в нелесные, в частности, степь. Результаты моделирования растительного покрова при изменении климата к 2080 г. с использованием климатических моделей версии AR5 показывают, что на трети территории будет происходить остепнение, около половины площади останется без изменений, а в высокогорьях возможно продвижение верхней границы леса в тундру.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00496).

Библиографический список

1. Барталев, С.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35 (1). – С. 103–116.
2. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 2. – С. 84–97.
3. Курбанов, Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. Т. 13. – № 1. – С. 36–48.
4. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS / Э.А. Курбанов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123–132.
5. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18–32.
6. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола: ПГТУ. – 2015. – 131 с.
7. МГЭИК, 2007: Изменение климата 2007 г. Обобщающий доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Р.К. Пачаури, А. Райзингер и основная группа авторов (ред.). – МГЭИК, Женева. – 2007. – 104 с.
8. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации: приказ Минприроды России № 367 от 18.08.2014 (ред. от 21.03.2016). – М., 2014. – 21 с.
9. Усольцев, В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 636 с.
10. Швецов, Е.Г. Спутниковый мониторинг состояния лесной растительности после воздействия пожаров в Забайкальском крае / Е.Г. Швецов, Е.А. Кукавская, Л.В. Бурак // Сибирский экологический журнал. – 2016. – Т. 23 (6). – С. 832–842.

11. Baig, M.H.A. Derivation of a tasselled Cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance / M.H.A. Baig, L. Zhang, T. Shuai, Q. Tong // *Remote Sensing Letters*. – 2014. – Vol. 5. – P. 423–431.
12. Bartalev, S.A. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia / S.A. Bartalev, A. Belward, D.V. Erchov, A.S. Isaev // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 24 (9). – P. 1977–1982.
13. Belgiu, M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis / M. Belgiu, O. Csillik // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 204. – P. 509–523.
14. Bodart, C. Pre-processing of a sample of multi-scene and multi-date Landsat imagery used to monitor forest cover changes over the tropics / C. Bodart, H. Eva, R. Beuchle, et al. // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* – 2011. – Vol. 66. – P. 555–563.
15. Boucher, J. Assessing the effectiveness of Landsat 8 chlorophyll a retrieval algorithms for regional freshwater monitoring / J. Boucher, K.C. Weathers, H. Norouzi, B. Steele // *Ecol Appl.* – 2018. – Vol. 28(4). – P. 1044–1054.
16. Cingolani, A.M. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units / A.M. Cingolani, D. Renison, M.R. Zak et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – Vol. 92. – P.84–97.
17. Chander, G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113 (5). – P. 893–903.
18. Coppin, P. Digital change detection methods in ecosystem monitoring a review / P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys // *International Journal of Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 25 (9). – P. 1565–1596.
19. Crist, E.P. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data-the TM Tasseled Cap / E.P. Crist, R.C. Cicone // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1984. – Vol. GE-22 (3). – P. 256–263.
20. Friedl, M.A. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results / M.A. Friedl, D.K. McIver, J.C.F. Hodges, et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 83. – P. 287–302.
21. Gitas, I. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring – A Review / I. Gitas, G. Mitri, S. Veraverbeke, A. Polychronaki // *Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications*. – 2012.
22. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M.C. Hansen, P.V. Potapov, R. Moore et al. // *Science*. – 2013. – Vol. 342 (6160). – P. 850–853.
23. Healey, S.P. Comparison of Tasseled Cap – based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S.P. Healey, W.B. Cohen, Y. Zhiqiang, O.N. Krankina // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 97. – P. 301–310.
24. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
25. Kauth, R.J. The tasseled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat / R.J. Kauth and G.S. Thomas // *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, Indiana. – 1976. – P. 41–51.
26. Liu, Q. Classification of Landsat 8 OLI image using support vector machine with Tasseled Cap Transformation / Q. Liu, Y. Guo, G. Liu, J. Zhao // *10th International Conference on Natural Computation (ICNC)*. – Xiamen, China, 2014.
27. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. Eds. G. Gutman, R. Volker. – 2017.
28. Loveland, T.R. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data / T.R. Loveland, B.C. Reed, J.F. Brown et al. // *International journal of remote sensing*. – 2000. – Vol. 21. – P. 1303–1330.
29. Richards, J.A. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* / J.A. Richards. – Springer Science & Business Media, 2012. – 494 p.
30. Soja, A.J. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations / A.J. Soja, N.M. Tchepakova, N.H.F. French et al. // *Glob. Planet. Change (Special NEESPI Issue)*. – 2007. – Vol. 56. – P. 274–296.
31. Song, C. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects / C. Song, C.E. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney, S.A. Macomber // *Remote Sensing of Environment*. – 2001. – Vol. 75 (2). – p.230–244.
32. Tchepakova, N.M. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate / N.M. Tchepakova, E.I. Parfenova, A.J. Soja // *Environmental Research Letters*. – 2009. – Vol. 4. – P. 1–9.
33. Tchepakova, N.M. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia from observed data / N.M. Tchepakova, E.I. Parfenova, A.J. Soja // *Regional Environmental Change*. – 2011. – Vol. 11 (4). – P. 817–827.
34. Vittek, M. Land Cover Change Monitoring Using Landsat MSS/TM Satellite Image Data over West Africa between 1975 and 1990 / M. Vittek, A. Brink, F. Donnay, D. Simonetti, B. Desclée // *Remote Sens.* – 2014. – Vol. 6. – P. 658–676.
35. Wang A. Estimating changes in global vegetation cover (1850–2100) for use in climate models / A. Wang, D.T. Price, V. Arora // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2006. – Vol. 20 (3).
36. Zhu, Z. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery / Z. Zhu, C.E. Woodcock // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 118. – P. 83–94.

References

1. Bartalev, S.A. Raspoznavanie pahotnyh zemel' na osnove mnogoletnih sputnikovyh dannyh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoj klassifikacii (Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometer MODIS and locally adaptive supervised classification), S.A. Bartalev, V.A. Egorov, E.A. Loupian, D.E. Plotnikov, I.A. Uvarov, *Komp'yuternaya optika*, 2011, Vol. 35, No. 1, Pp. 103-116.
2. Vorobiev, O.N. Distancionnyj monitoring vosstanovitel'noj dinamiki rastitel'nosti na garyah Marijskogo lesnogo Zavolzh'ya (Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests), O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, Pp. 84-97.
3. Kurbanov, E.A. Ocenka tochnosti i sopostavimosti tematiceskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya (Assessment of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolution on the example of the Middle Volga region), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, YU.A. Polevshchikova, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, T. 13, № 1, Pp. 36-48.
4. Kurbanov, E.A. Dva desyatiletiya issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS (Two decades of land cover research by MODIS), E.A. Kurbanov, *Lesnye ehkosistemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring: sbornik nauchnyh statej [EHlektronnyj resurs]*, Joshkar-Ola: PGU, 2016, № 2, Pp. 123-132.
5. Kurbanov, E.A. CHetyre desyatiletiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat (Four decades of forest research from Landsat imagery), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, YU.A. Polevshchikova, E.N. Demisheva, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. EHkologiya. Prirodopol'zovanie*, 2014, № 1(21), Pp. 18-32.
6. Kurbanov, E.A. Tematiceskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validaciya i ocenka tochnosti (Thematic mapping of vegetation cover using satellite images: validation and assessment of accuracy), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, S.A. Lezhnin, A.V. Gubaev, YU.A. Polevshchikova, Joshkar-Ola: PGU, 2015, 131 p.
7. Pachauri, R.K. IPCC, 2007: Climate Change 2007 (Synthesis Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), R.K. Pachauri, A. Reisinger, Core Writing Team (Eds.), IPCC, Geneva, 2007, 104 p.
8. Prikaz Minprirody Rossii "Ob utverzhdenii Perechnya lestorastitel'nyh zon Rossijskoj Federacii i Perechnya lesnyh rajonov Rossijskoj Federacii" (The Order of the Ministry of Natural Resources of Russia "On the Approval of the List of Forest Plant Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation"), Moscow, 2014, No. 367, 21 p.
9. Usoltsev, V.A. Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoj Evrazii: metody, baza dannyh i ee prilozheniya (Biological productivity of Northern Eurasia's forests: methods datasets, applications), Yekaterinburg: UB RAS, 2007, 636 p.
10. Shvetsov, E.G. Satellite monitoring of the state of forest vegetation after fire impacts in the Zabaikal region, E.G. Shvetsov, E.A. Kukavskaya, L.V. Buryak, *Contemporary problems of ecology*, 2016, Vol. 9, No. 6, Pp. 702-710.
11. Baig, M.H.A. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, M.H.A. Baig, L. Zhang, T. Shuai, Q. Tong, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, Pp. 423-431.
12. Bartalev, S.A. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, S.A. Bartalev, A. Belward, D.V. Erchov, A.S. Isaev, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, Pp.1977-1982.
13. Belgiu, M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis, M. Belgiu, O. Csillik, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, Pp. 509-523.
14. Bodart, C. Pre-processing of a sample of multi-scene and multi-date Landsat imagery used to monitor forest cover changes over the tropics, C. Bodart, H. Eva, R. Beuchle et al., *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, Vol. 66, Pp. 555-563.
15. Boucher, J. Assessing the effectiveness of Landsat 8 chlorophyll a retrieval algorithms for regional freshwater monitoring, J. Boucher, K.C. Weathers, H. Norouzi, B. Steele, *Ecological Applications*, 2018, Vol. 28, No. 4, Pp. 1044-1054.
16. Chander, G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 5, Pp. 893-903.
17. Cingolani, A.M. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units, A.M. Cingolani, D. Renison, M.R. Zak et al., *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 92, Pp. 84-97.
18. Coppin, P. Digital change detection methods in ecosystem monitoring a review, P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, *International Journal of Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 9, Pp. 1565-1596.
19. Crist, E.P. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data-the TM Tasseled Cap, E.P. Crist, R. C. Cicone, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, Vol. GE-22, No. 3, Pp. 256-263.
20. Friedl, M.A., Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results, M.A. Friedl, D.K. McIver, J.C.F. Hodges et al., *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, Pp. 287-302.
21. Gitas, I. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring – A Review (Introduction to Remote Sensing of Biomass), I. Gitas, G. Mitri, S. Veraverbeke, A. Polychronaki, *Remote sensing of Biomass – Principles and Applications*, 2012, Pp. 143-176.

22. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, M.C. Hansen, P.V. Potapov, R. Moore et al., *Science*, 2013, Vol. 342, No. 6160, Pp. 850-853.
23. Healey, S.P. Comparison of Tasseled Cap – based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, S.P. Healey, W.B. Cohen, Y. Zhiqiang, O.N. Krankina, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 97, Pp. 301-310.
24. Stocker, T.F. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
25. Kauth, R.J. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat, R.J. Kauth, G.S. Thomas, *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Indiana, 1976, Pp. 41-51.
26. Liu, Q. Classification of Landsat 8 OLI image using support vector machine with Tasseled Cap Transformation, Q. Liu, Y. Guo, G. Liu, J. Zhao, *Proc. Conf. 10th International Conference on Natural Computation*, China, 2014, Pp. 670-674.
27. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Eds. G. Gutman, R. Volker, 2017.
28. Loveland, T.R. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data, T.R. Loveland, B.C. Reed, J.F. Brown et al., *International journal of remote sensing*, 2000, Vol. 21, Pp. 1303-1330.
29. Richards, J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, J.A. Richards, 2012, 494 p.
30. Soja, A.J. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations, A.J. Soja, N.M. Tchepakova, N.H.F. French et al., *Global and Planetary Change*, 2007, Vol. 56, Pp. 274-296.
31. Song, C. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects, C. Song, C.E. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney, S.A. Macomber, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 75, No. 2, Pp. 230-244.
32. Tchepakova, N.M. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate, N.M. Tchepakova, E.I. Parfenova and A.J. Soja, *Environmental Research Letter*, 2009, Vol. 4, Pp. 1-9.
33. Tchepakova, N.M. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia from observed data, N.M. Tchepakova, E.I. Parfenova and A.J. Soja, *Regional Environmental Change*, 2011, Vol. 11, No. 4, Pp. 817-827.
34. Vittek, M. Land Cover Change Monitoring Using Landsat MSS/TM Satellite Image Data over West Africa between 1975 and 1990, M. Vittek, A. Brink, F. Donnay, D. Simonetti and B. Desclée, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, Pp. 658-676.
35. Wang A. Estimating changes in global vegetation cover (1850–2100) for use in climate models, A. Wang, D.T. Price, V. Arora, *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, Vol. 20, No. 3, Pp. 1-15.
36. Zhu, Z. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery, Z. Zhu, C.E. Woodcock, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 118, Pp. 83-94.

УДК 528.88

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАРУШЕННЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Э.А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Анализ влияния нарушенности лесных массивов на их спектральный отклик является одной из актуальных задач мониторинга лесопокрытых земель. В статье представлены результаты оценки спектрально-отражательных свойств лесных экосистем, характеризующихся различной нарушенностью верхних ярусов. Исследование проведено на примере лиственных лесов лесостепной зоны (территория Белгородской области). Установлено, что коэффициенты спектральной яркости в ближней (0,845-0,885 мкм) и средней инфракрасной (1,56-1,66 мкм) областях спектра статистически достоверно различны для разных категорий нарушенности лесных массивов. Результаты получены на основе анализа данных с 605 лесных ареалов с использованием ранее созданной карты нарушенности лесных экосистем и спутниковых данных Landsat 8 OLI. Коэффициенты спектральной яркости в обоих спектральных диапазонах уменьшаются по мере снижения нарушенности лесных экосистем. На основе анализа разновременных снимков Landsat 7 ETM+ 2001 года и Landsat 8 OLI 2018 года, прошедших радиометрическую калибровку, установлено, что коэффициенты спектральной яркости лесов в средней инфракрасной области, нарушенных в этот период, статисти-

чески значимо отличаются от коэффициентов отражения лесов, в которых не выявлено нарушений верхних ярусов. Среднее значение инфракрасных коэффициентов отражения нарушенных лесных ареалов в 7 раз выше, чем ненарушенных лесов. Нарушенные лесные экосистемы характеризуются более высокими величинами стандартных отклонений для спектрально-отражательных показателей. На основе значений разности коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,56-1,66 мкм получены экспериментальные результаты картографирования лесных экосистем, нарушенность которых выросла в период 2001-2018 гг.

Ключевые слова: лесные экосистемы, лесостепь, нарушенность, дистанционное зондирование, спутниковые данные, Landsat

ANALYSIS OF THE SPECTRAL AND REFLECTIVE PROPERTIES OF DISTURBED FOREST ECOSYSTEMS IN FOREST-STEPPE ZONE USING MULTITEMPORAL REMOTE SENSING DATA

E.A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The impact assessment of forest stands disturbance on their spectral response is in the foreground of forest cover monitoring. The paper presents the results of spectral-reflective properties assessment for forest ecosystems with different disturbance of upper canopy layers. The research was conducted on the example of deciduous forests of the forest-steppe zone (the territory of the Belgorod region). It has been determined that the coefficient of spectral brightness in the near (0.845 – 0.885 μm) and middle-infrared (1.56-1.66 μm) spectral area are statistically varied for different categories of forest disturbance. The results have been obtained on the basis of data analysis from 605 forest areas using the previously created map of forest ecosystems disturbance and Landsat 8 OLI remote sensing data. The reflectance in both spectral ranges reduces with disturbance decreasing of forest ecosystems. It was found that the coefficients of spectral brightness of forests in the middle infrared area, disturbed during this period, are statistically significantly different from the reflectance of the forests in which no disturbances of the upper layers have been detected. This conclusion has been drawn based on the analysis of Landsat 7 ETM + 2001 and Landsat 8 OLI 2018 multi-temporal images, which underwent radiometric calibration. The average value of the infrared coefficients of reflectance of disturbed forest areas is 7 times higher than that of undisturbed forests. Disturbed forest ecosystems are characterized by higher standard deviations of reflectance. Using values of the difference in spectral brightness coefficients in the range 1.56 -1.66 μm , the experimental results of forest ecosystem mapping were obtained, the disturbance of which increased in the period 2001-2018.

Key words: forest ecosystems, forest-steppe, disturbance, remote sensing, satellite data, Landsat

Введение. Нарушенность лесных экосистем, обусловленная влиянием сплошных лесосечных рубок, пожаров или иных факторов, выступает одним из ключевых параметров, характеризующих состояние лесов. В связи с этим актуальной становится проблема ее изучения и картографирования, в том числе с использованием спектральной спутниковой информации. Многозональные данные дистанционного зондирования могут быть эффективно применены для пространственного анализа лесопокрытых земель (Baumann et al., 2014; Белова, Ершов, 2015; Курбанов, 2016; Schmidt et al., 2015). Они все шире применяются и для оценки характеристик, описывающих состояние лесных массивов, включая возраст (Kuusinen et al., 2014), сомкнутость (Lukeš et al., 2013), долю поглощённой фотосинтетически активной радиации (Novi et al., 2017), особенности восстановления после воздействия нарушающих факторов (Loboda et al., 2012; Жирин и др., 2016; Воробьев, Курбанов, 2017).

Лесные экосистемы лесостепной зоны претерпели существенные пространственные изменения вследствие освоения территории (Чендев, 2008). Оценка современных изменений, про-

исходящих в лесах региона, во многом связана с выявлением тенденций изменения их нарушенности как фактора, влияющего на их биофизические параметры. Нарушенность лесных экосистем является одним из параметров, объективная пространственно-временная оценка которых проблематична без привлечения разновременных данных дистанционного зондирования (Achard et al., 2006; Borrelli et al., 2014; Воробьев и др., 2016)

Ранее (Терехин, 2017) на основе совместного анализа разновременных спутниковых данных и материалов полевых наблюдений лесные экосистемы юга лесостепи Среднерусской возвышенности по степени нарушенности верхнего яруса предложено подразделять следующие категории: ненарушенные (практически не встречаются), слабонарушенные, средненарушенные, сильнонарушенные, разрушенные и культурные. Т.е. нарушенность конкретного лесного массива, обусловленная влиянием сплошных лесосечных рубок, пожаров или усыхания древостоя, может быть описана через соотношение перечисленных категорий.

В то же время остаются открытыми вопросы отличий спектральных признаков разных категорий нарушенности лесов, а также проблема их автоматизированного картографирования и пространственно-временного анализа.

В лесах региона доминируют лиственные лесные массивы (дуб, ясень). В значительно меньшей степени представлены хвойные леса.

Цель исследования заключалась в анализе спектрально-отражательных характеристик разноразрушенных лесных экосистем, типичных для юга лесостепной зоны (на примере территории Белгородской области), оценке возможностей автоматизированного картографирования изменений в нарушенности верхних ярусов лесных массивов, типичных для региона, по спутниковым данным в период 2001-2018 гг.

Материалы, объект и методы исследования. В основу исследования был положен количественный анализ спектрально-отражательных характеристик лесных экосистем разной степени нарушенности.

На первом этапе была выполнена оценка значимости различий коэффициентов спектральной яркости для разных типов нарушенности лесных массивов: сильнонарушенных, средненарушенных и слабонарушенных. Их подробное описание представлено в соответствующей статье (Терехин, 2017). По причине того, что ненарушенные и разрушенные экосистемы лиственных лесов в регионе представлены очень немногочисленно, в настоящем исследовании их не анализировали.

Для объективного анализа коэффициентов спектральной яркости (reflectance) лесных экосистем нами была сформирована выборка из участков лесных массивов, расположенных на территории Корочанского и Шебекинского административных районов Белгородской области. Для формирования выборки была использована ранее полученная карта нарушенности верхних ярусов лесных экосистем региона, созданная на основе разновременных спутниковых данных и характеризующая нарушенность лесов по состоянию на 2015 год (Терехин, 2017). Фрагмент карты показан на рисунке 1.

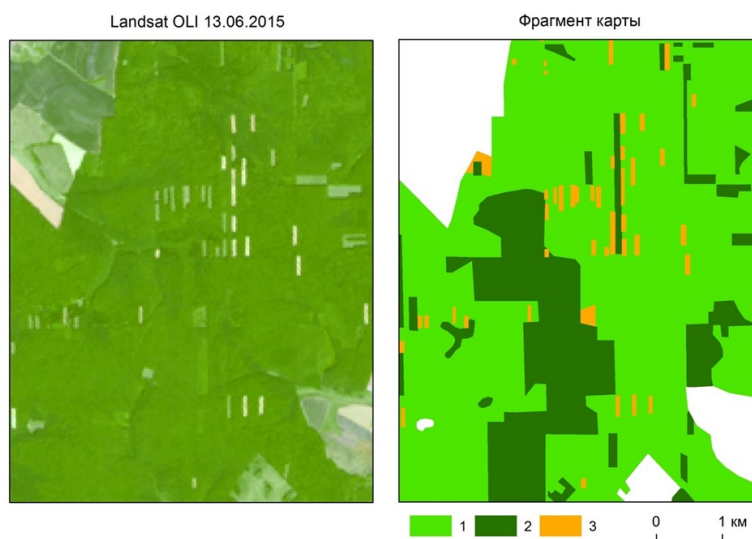


Рис. 1. Фрагмент карты нарушенных лесных экосистем Белгородской области, созданной на основе разновременных снимков 1986-2015 гг. Лесные экосистемы: 1 – слабонарушенные, 2 – средненарушенные леса, 3 – сильнонарушенные. Синтез каналов landsat OLI: 7-6-4

Основными критериями при формировании выборки были следующие: минимальная площадь лесного ареала – 2-2,5 га, породный состав – лиственный.

Минимальная анализируемая площадь лесного ареала 2-2,5 га обусловлена ограничениями пространственного разрешения используемых спутниковых данных Landsat (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), составляющего 30 м/пиксель. Анализируемая выборка включала 605 лесных ареалов общей площадью 41466,7 га (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики выборки лесных массивов, использованной для анализа спектрально-отражательных признаков нарушенных лесных экосистем

Тип нарушения	Количество лесных ареалов	Площадь средняя, га	Площадь суммарная, га
Сильнонарушенные	113	7,9	892,2
Средненарушенные	206	34,1	7023,5
Слабонарушенные	286	117,3	33551,0
Всего	605	68,5	41466,7

Сформированная выборка наглядно отражает ряд основных особенностей лесов региона. Сильнонарушенные участки лесных массивов (влияние нарушающих факторов, например рубок, проявлялось за последние 20 лет) в регионе характеризуются небольшой площадью и обусловлены преимущественно проведением сплошных рубок небольшого размера, т.к. промышленных лесозаготовок в регионе не ведется. При этом сплошные рубки выступают основным фактором нарушения верхних ярусов. Средненарушенные леса представлены старыми сплошными вырубками, возрастом более 25-30 лет. До начала 1990-х сплошные рубки в области по размеру были значительно больше, чем сейчас, что наглядно отразилось в средней площади средненарушенных лесных экосистем. Ареалы слабонарушенных лесов (последние сплошные рубки проводились более 50 лет назад) характеризуются наибольшей как суммарной, т.к. и средней площадью.

Все лесные массивы были представлены в виде векторных контуров, что позволило учитывать их площадные характеристики и рассчитывать для них спектральные признаки.

Для каждого анализируемого ареала нарушения (из 605 единиц) был вычислен набор спектральных показателей в виде коэффициентов отражения в ближней инфракрасной (0,845 – 0,885 мкм) и двух средних инфракрасных спектральных областях (1,56-1,66 мкм и 2,1-2,3 мкм). Для их расчета был использован космический снимок Landsat-8 OLI (path 177, row 25), полученный 13 июня 2015 года, т.е. на год, характеризующий нарушение верхних ярусов лесных экосистем. Для снимка была выполнена радиометрическая калибровка, в результате которой он был пересчитан в безразмерные коэффициенты спектральной яркости, принимающие значения от 0 до 1. Таким образом, сформировали выборку, позволившую статистически проанализировать степень различия спектральных характеристик для разных категорий нарушения верхнего яруса лиственных лесных экосистем. Статистический анализ включал оценку значимости различий зональных коэффициентов отражения для различных категорий нарушения.

На втором этапе исследования было выполнено сравнение коэффициентов спектральной яркости лесных массивов, нарушенных в период 2001-2018 годов, с коэффициентами спектральной яркости лесов, верхние ярусы которых не претерпели изменения за соответствующий период времени.

Для этой цели на основе разновременных снимков Landsat ETM+ и Landsat OLI выполнено выявление и картографирование лесных ареалов, нарушенных в период 2001-2018 годов. Оно было проведено на примере группы из лесных массивов общей площадью 10112 га, расположенных на территории Корочанского и Шебекинского районов Белгородской области.

Снимок Landsat 7 ETM+ был получен 17 июля 2001 года. Снимок Landsat 8 OLI сделан 21 июня 2018 года.

Таким образом, была сформирована выборка, включающая две категории лесов: нарушенные в период 2001-2018 гг. и ненарушенные за этот же период. В общей сложности отобрано 129 ареалов лесных массивов, верхние ярусы которых были существенно нарушены в период 2001-2018 гг., и 503 лесных ареала без нарушений.

Оба снимка прошли радиометрическую калибровку, в результате которой их пересчитали в безразмерные коэффициенты спектральной яркости. Для анализа нами были использованы коэффициенты спектральной яркости среднего инфракрасного диапазона. Он был выбран в связи с тем, что является одним из наиболее чувствительных диапазонов к изменениям, происходящим в лесах, связанных с нарушениями их верхнего яруса. Он соответствует 5-му каналу сенсора ETM+ (1,55-1,75 мкм) и 6-му каналу сенсора OLI (1,56-1,66 мкм). Каналы сенсоров по охвату длин волн немного отличаются между собой, что надо учитывать при сравнении спектральных характеристик, рассчитанных на их основе. В то же время, как показали исследования (Li et al., 2014), спектральные показатели, рассчитанные по сенсорам ETM+ и OLI, характеризуются очень тесной корреляцией, в связи с чем данные с них можно сопоставлять на количественном уровне (Курбанов и др., 2015).

Для анализа временных изменений в спектральном отклике нами был вычислен растр разности инфракрасных коэффициентов спектральной яркости по снимкам 2001 и 2018 гг., предварительно прошедших этап радиометрической калибровки. После этого значения разности коэффициентов спектральной яркости методом зональной статистики были рассчитаны для каждого анализируемого лесного ареала. Таким образом, сформирована выборка, позволившая количественно сравнить и проанализировать степень различия коэффициентов спектральной яркости лесов без нарушений верхних ярусов в период 2001-2018 гг. и лесов, в которых за этот период времени была выявлена нарушенность, обусловленная в первую очередь влиянием сплошных лесосечных рубок. Статистическая оценка коэффициентов спектральной яркости была выполнена с использованием t-критерия Стьюдента.

На заключительном этапе осуществлена экспериментальная оценка возможности картографирования лесных ареалов, нарушенность которых выросла в период 2001-2018 гг.

Результаты исследования. Оценка значений коэффициентов спектральной яркости для различных категорий нарушенности лесов методом дисперсионного анализа позволила установить значимое влияние нарушенности лиственных лесов на значения их спектрально-отражательных характеристик. Значения F-критерия для всех коэффициентов спектральной яркости из всех трех анализируемых диапазонов оказались значительно выше критических значений на уровне значимости 0,05 при числе степеней свободы 604. При критической величине F-критерия 3,84 его расчетная величина составила: 132,7 – для КСЯ (коэффициента спектральной яркости) в диапазоне 0,845-0,885 мкм; 131,0 – для КСЯ в диапазоне 1,56-1,66 мкм; 27,8 – для КСЯ в диапазоне 2,1-2,3 мкм.

Установлено, что коэффициенты отражения в ближней инфракрасной области (5 канал сенсора OLI) и средней инфракрасной (6-й канал сенсора OLI) значимо различаются для всех анализируемых категорий нарушенности лесов (по критерию наименьшей значимой разности и критерию Шеффе). Для средней инфракрасной области (7-й канал сенсора OLI) значимых различий между слабо- и средненарушенными лесами не установлено.

Различия коэффициентов отражения для разных категорий нарушенности наглядно отражены на графике (рис. 2).

Одновременно установлено, что значения коэффициентов спектральной яркости во всех анализируемых зонах спектра снижаются по мере уменьшения нарушенности верхних ярусов лесных экосистем. На примере коэффициентов отражения в средней инфракрасной спек-

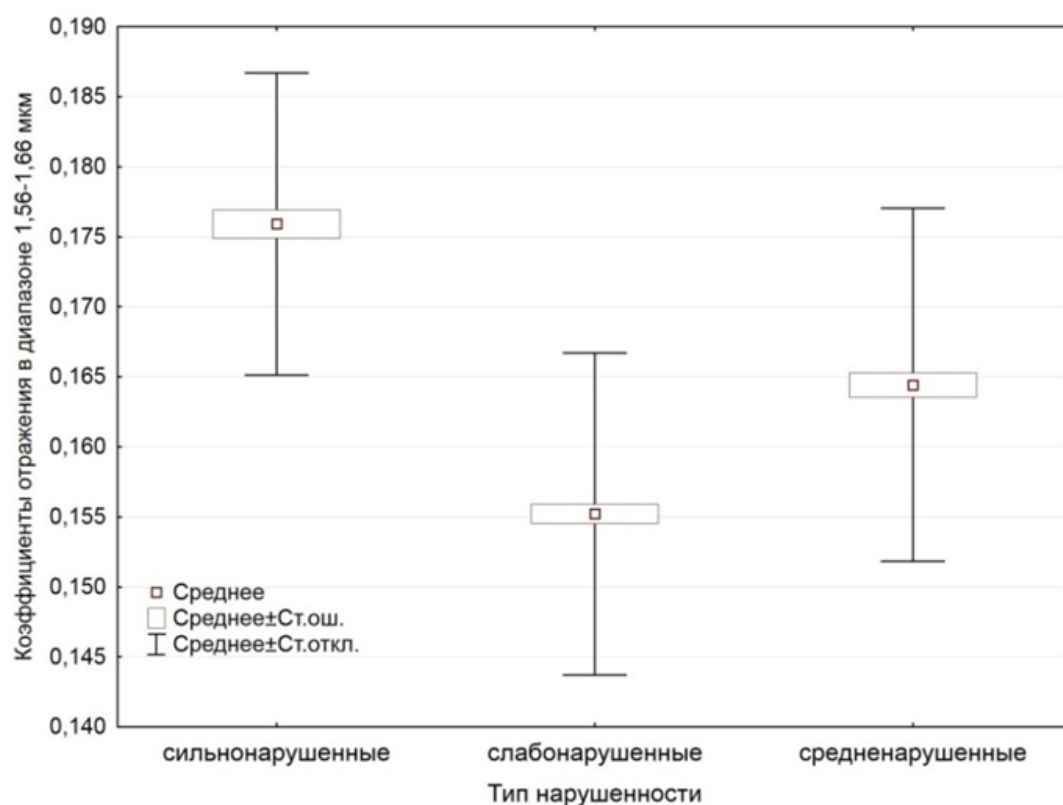


Рис. 2. График значений среднего инфракрасного диапазона (1,56-1,66 мкм) для различных категорий нарушения лесных экосистем

тральной области (6-й канал сенсора OLI) видно (табл. 2), что снижение проявляется как в средних, так и в максимальных и минимальных величинах коэффициентов спектральной яркости.

Характеристики коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,56-1,66 мкм для различных типов нарушения лесных экосистем

Таблица 2

Тип нарушения	Среднее	Минимум	Максимум	Ст. откл.
Сильнонарушенные	0,176	0,156	0,222	0,011
Среденарушенные	0,164	0,143	0,216	0,013
Слабонарушенные	0,155	0,103	0,197	0,011

Таким образом, выявлены статистически значимые различия коэффициентов спектральной яркости в диапазонах 0,845-0,885 мкм и 1,56-1,66 мкм для разных категорий нарушения лесных экосистем. Это говорит о том, что фактор нарушения лесов достоверно влияет на значения зональных спектрально-отражательных характеристик. В связи с этим имело смысл количественно проанализировать значения отражательных характеристик для лесных экосистем, нарушение которых возросло в анализируемый период времени, т.е. лесов, которые по предложенной классификации относятся к категории сильнонарушенных.

Результаты сравнения величины изменения КСЯ в диапазоне 1,56-1,66 мкм для лесов, нарушенных в период 2001-2018 гг. и не нарушенных за это время, по t-критерию Стьюдента показали, что его расчетная величина (58,6) намного выше критического значения, составляющего 1,967 для соответствующего числа степеней свободы (631). Соответствующие результаты указывают на значимость различий средних значений КСЯ среднего инфракрасного диапазона для ненарушенных лесов и нарушенных лесов в период 2001-2018 гг.

Необходимо отметить, что одновременно выявлены значительные отличия в величине стандартных отклонений для этих категорий лесов (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики величины изменения коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,56-1,66 мкм для лесов, нарушенных в период 2001-2018 гг., и лесов без нарушений верхних ярусов

Тип лесных ареалов	Среднее	Число лесных ареалов	Ст. отклонение	Минимум	Максимум
Без следов нарушенности в 2001-2018 гг.	0,007	503	0,005	-0,010	0,040
Нарушенные в период 2001-2018 гг.	0,049	129	0,013	0,018	0,076

Таким образом, результаты статистического анализа указывают на возможность автоматизированного выявления нарушений в верхних ярусах лиственных лесных экосистем путем оценки величины изменений их коэффициентов отражения за анализируемый период времени. На это указывает высокая степень отличия величины изменения инфракрасных КСЯ нарушенных лесов и аналогичных значений лесов, не претерпевших нарушений.

Исходными материалами в этом случае выступает растр разности значений коэффициентов спектральной яркости между конечной и начальной анализируемой датой. На основе результатов статистического анализа соответствующий растр можно кластеризовать или бинаризовать таким образом, чтобы он был разделен на диапазоны значений, соответствующих разным классам нарушенности. Первый диапазон – величины изменений коэффициентов спектральной яркости, соответствующие лесным экосистемам, верхние ярусы которых были нарушены за анализируемый период времени. Второй диапазон – величины изменений коэффициентов спектральной яркости, соответствующие ареалам лесов, верхние ярусы которых не подвергались нарушениям. С другой стороны, такое разделение будет осложняться высоким размахом варьирования значений коэффициента отражения для нарушенных и ненарушенных лесов, и формирование количественных критериев, позволяющих отнести конкретный лесной ареал к определенной категории лесов, потребует дополнительных исследований их спектральных признаков.

Кластеризация значений полученного растра величин изменений КСЯ инфракрасного диапазона в 2001-2018

гг. позволила, тем не менее, выявить таким способом ареалы нарушенных лесов на экспериментальных лесных участках, хотя и с определенной погрешностью (рис. 3).

Однако подробное решение этой задачи обуславливает необходимость применения методов многомерного анализа, что, в свою очередь, требует отдельного исследования.

Выводы. На основе анализа свыше 600 ареалов лиственных лесных массивов, располо-

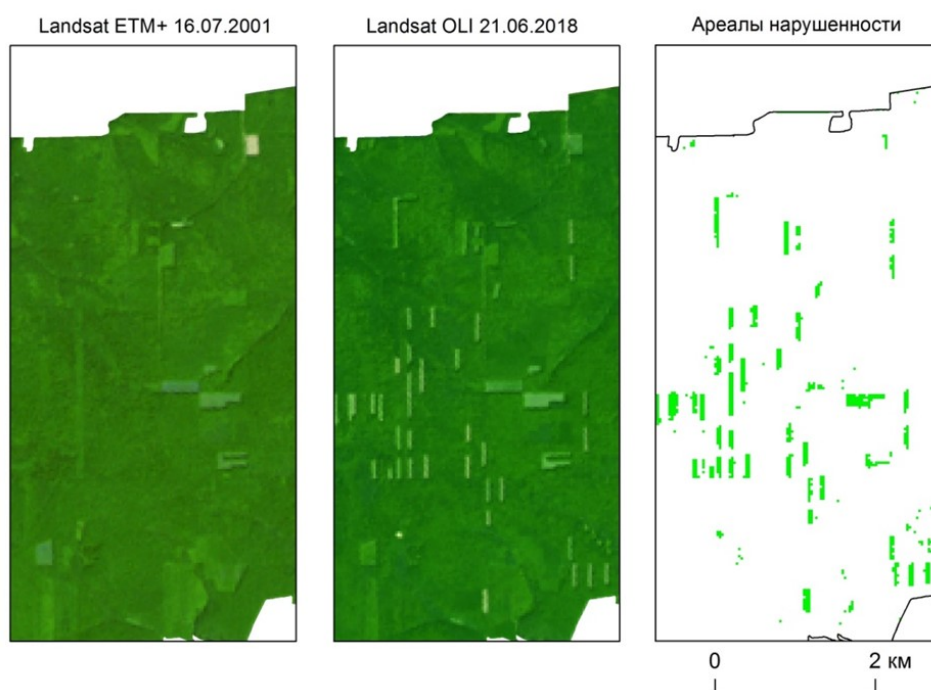


Рис. 3. Пример выявления ареалов лесов, нарушенных в период 2001-2018 гг., на основе величины изменения коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,56-1,66 мкм

женных в южной лесостепи (территория Белгородской области), установлены статистически значимые различия в значениях зональных коэффициентов отражения для разных категорий нарушенности лесных экосистем. Исследованы спектрально-отражательные характеристики следующих категорий лесных экосистем по степени нарушений верхних ярусов: слаборащенные, среденарушенные, сильнонарушенные. Коэффициенты спектральной яркости изучены на основе снимков Landsat OLI, прошедших радиометрическую калибровку. Выявлены статистически значимые различия в величине изменения инфракрасных коэффициентов отражения для лесов, нарушенных в период 2001-2018 гг., и лесов без признаков нарушений верхних ярусов за аналогичный период времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00049)

Библиографический список

1. Белова, Е.И. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам landsat / Е.И. Белова, Д.В. Ершов // Лесоведение. – 2015. – № 5. – С. 339-345.
2. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
3. Воробьев, О.Н. 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. – Том. 13. – № 4. – С. 124-134.
4. Жирин, В.М. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйшлина // Лесоведение. – 2016. – № 1. – С. 3-14.
5. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132.
6. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – 131 с.
7. Терехин, Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 4. – С. 112-124.
8. Чендев, Ю.Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене / Ю.Г. Чендев. – М.: ГЕОС, 2008. – 212 с.
9. Achard, F. Areas of rapid forest-cover change in boreal Eurasia / F. Achard, D. Mollicone, H.-J. Stibig, D. Aksenov, L. Laestadius, Z. Li, P. Popatov, A. Yaroshenko // Forest Ecology and Management – 2006. – Vol. 237. № 1. – P. 322-334.
10. Baumann, M. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance / M. Baumann, M. Ozdogan, P. T. Wolter, A. Krylov, N. Vladimirova, V. C. Radeloff // Remote Sensing of Environment – 2014. – Vol. 143. – P. 171-179.
11. Borrelli, P. Detection of harvested forest areas in Italy using Landsat imagery / P. Borrelli, S. Modugno, P. Panagos, M. Marchetti, B. Schütt, L. Montanarella // Applied Geography – 2014. – Vol. 48. – P. 102-111.
12. Hovi, A. Seasonality of albedo and FAPAR in a boreal forest / A. Hovi, P. Lukeš, M. Rautiainen // Agricultural and Forest Meteorology – 2017. – Vol. 247. – P. 331-342.
13. Kuusinen, N. Effects of forest age on albedo in boreal forests estimated from MODIS and Landsat albedo retrievals / N. Kuusinen, E. Tomppo, Y. Shuai, F. Berninger // Remote Sensing of Environment – 2014. – Vol. 145. – P. 145-153.
14. Li, P. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors / P. Li, L. Jiang, Z. Feng // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6. – No. 1.
15. Loboda, T. A Joint NASA GOFCC-GOLD and NEESPI workshop to examine the natural, socio-economic, and land use impacts of the 2010 drought in European Russia / T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov // The Earth observer. – 2012. – Vol. 24(5). – P. 36-40.
16. Lukeš, P. Relationship between forest density and albedo in the boreal zone / P. Lukeš, P. Stenberg, M. Rautiainen // Ecological Modelling – 2013. – Vol. 261. – P. 74-79.
17. Schmidt, M. Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia / M. Schmidt, R. Lucas, P. Bunting, J. Verbesselt, J. Armston // Remote Sensing of Environment – 2015. – Vol. 158. – P. 156-168.

References

1. Belova, E.I. Opyt ocenki estestvennogo lesovosstanovlenija na sploshnyh vyrubkah po vremennym rjadam Landsat (Experience in estimating natural reforestation on clear cuttings by Landsat time series), E.I. Belova, D.V. Ershov, *Lesovedenie*, 2015, No. 5, Pp. 339-345.
2. Vorobiev, O.N. Distancionnyj monitoring vosstanovitel'noj dinamiki rastitel'nosti na garjah Marijskogo lesnogo Zavolzh'ja (Remote monitoring of the restorative dynamics of vegetation on the burned areas of the Mari forest Volga region), O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 2, No. 14, Pp. 124-134.
3. Vorobiev, O.N. Ocenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po snimkam Landsat (Assessment of the dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Volga region using the Landsat images), O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, Ju.A. Polevshhikova, S.A. Lezhnin, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, Pp. 124-134.
4. Zhirin, V.M. Mnogoletnjaja dinamika vegetacionnyh indeksov temnohvojnyh lesov posle povrezhdenija sibirskim shelkoprpjadam (Long-term dynamics of vegetation indices of dark-coniferous forests after damages by the Siberian silkworm), V.M. Zhirin, S.V. Knjazeva, S.P. Jejdlina, *Lesovedenie*, 2016, No. 1, Pp. 3-14.
5. Kurbanov, E.A. Dva desjatiletija issledovanij rastitel'nogo pokrova po MODIS (Two decades of vegetation research on MODIS), E.A. Kurbanov, Proc. Conf. *Lesnye jekosistemy v uslovijah izmenenija klimata: biologicheskaja produktivnost' i distancionnyj monitoring: sbornik nauchnyh statej*, Joshkar-Ola, 2016, No. 2, Pp. 123-132.
6. Kurbanov, E. A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validacija i ocenka tochnosti (Thematic mapping of vegetation cover using satellite images: validation and assessment of accuracy), E.A. Kurbanov, O.N. Vorobiev, S.A. Lezhnin, A.V. Gubaev, Ju.A. Polevshhikova, Monografija, Joshkar-Ola, 2015, 131 p.
7. Terehin, Je.A. Ocenka narushennosti lesnyh jekosistem jugo-zapada Srednerusskoj vozvyshennosti s primeneniem materialov kosmicheskikh snimkov (Assessment of disturbance of forest ecosystems of the south-west of the Central Russian Upland using satellite imagery materials), Je.A. Terehin, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, Pp. 112-124.
8. Chendev, Ju.G. Jevojlucija lesostepnyh pochv Srednerusskoj vozvyshennosti v golocene (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Ju.G. Chendev, Moscow, 2008, 212 p.
9. Achard, F. Areas of rapid forest-cover change in boreal Eurasia, F. Achard, D. Mollicone, H.-J. Stibig, D. Aksenov, L. Laestadius, Z. Li, P. Popatov, A. Yaroshenko, *Forest Ecology and Management*, 2006. Vol. 237, No. 1, Pp. 322-334.
10. Baumann, M. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance, M. Baumann, M. Ozdogan, P. T. Wolter, A. Krylov, N. Vladimirova, V. C. Radeloff, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143, Pp.171-179.
11. Borrelli, P. Detection of harvested forest areas in Italy using Landsat imagery, P. Borrelli, S. Modugno, P. Panagos, M. Marchetti, B. Schütt, L. Montanarella, *Applied Geography*, 2014, Vol. 48, Pp. 102-111.
12. Hovi, A. Seasonality of albedo and FAPAR in a boreal forest, A. Hovi, P. Lukeš, M. Rautiainen, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, Vol. 247, Pp. 331-342.
13. Kuusinen, N. Effects of forest age on albedo in boreal forests estimated from MODIS and Landsat albedo retrievals, N. Kuusinen, E. Tomppo, Y. Shuai, F. Berninger, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 145, Pp. 145-153.
14. Li, P. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors, P. Li, L. Jiang, Z. Feng, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 1, Pp. 310-329.
15. Loboda, T. A Joint NASA GOFC-GOLD and NEESPI workshop to examine the natural, socio-economic, and land use impacts of the 2010 drought in European Russia, T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov, *The Earth observer*, 2012, Vol. 24, No. 5, Pp. 36-40.
16. Lukeš, P. Relationship between forest density and albedo in the boreal zone, P. Lukeš, P. Stenberg, M. Rautiainen, *Ecological Modelling*, 2013, Vol. 261, Pp. 74-79.
17. Schmidt, M. Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia, M. Schmidt, R. Lucas, P. Bunting, J. Verbesselt, J. Armston, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 158, Pp. 156-168.

УДК 33.338.2

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ «ЗЕЛеной» ЭКОНОМИКИ В РОССИИ

Н.А. Хуторова

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Статья посвящена оценке прогресса построения зеленой экономики России. Отмечено, что серьезные изменения климата и возросший уровень антропогенной нагрузки на экосистему стимулирует государства, бизнес и общество к трансформации построения экономических моделей зеленой экономики. Целью настоящей работы стало выявление основных трендов развития «зеленой» экономики в России и их перспективы. Статья содержит оценку основных зеленых индикаторов роста российской экономики, которая проводится на

основе анализа ряда показателей: энергоемкости, углеродоемкости, динамики потребления чистой воды, динамики образования твердых коммунальных отходов и т.п. Выявлен отчетливый тренд повышения эффективности использования природных ресурсов. Реализуются комплексные программы экологической модернизации, в результате которых будут получены экономические, социальные и экологические выгоды, способствующие устойчивому развитию российской экономики. В результате проведенного анализа выявлено, что в целом российская модель зеленой экономики формируется по традиционным направлениям с учетом национальной специфики, где основные роли будут играть постоянно совершенствующиеся модели социально ответственного бизнеса и новые поведенческие модели потребителя. Также отмечено возрастание влияния нефинансовой отчетности на уровень конкурентоспособности компаний, т.к. экологические рейтинги включены в систему оценки надежности компании и оказывают существенное влияние на стоимость привлечения ресурсов. В рамках построения зеленой экономики усиливается роль общественного контроля в экологическом мониторинге регионов.

Ключевые слова: зеленая экономика, зеленый рост, экологическая модернизация, устойчивое развитие, корпоративная социальная ответственность, поведенческая модель социально ответственного потребителя.

MODERN TRENDS OF RUSSIAN GREEN ECONOMY

N.A. Khutorova

Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation

The article evaluates the progress achieved in establishing green economy in Russia. It has been emphasized that significant climate change and ever increasing level of anthropogenic impact on the ecosystem motivates the state, businesses and society to shift towards green economy models. The work is aimed at the identification of the main trends in the development of green economy and its prospects in Russia. The paper provides the assessment results of the main green indicators of the Russian economy, which is based on the analysis of such indicators as energy intensity, carbon intensity, dynamics of clean water consumption, dynamics of solid municipal waste generation, etc. A distinct trend of increasing the effectiveness of natural resources management has been revealed. Complex programs of environmental modernization have been implemented. These programmes are aimed at economic, social and environmental benefits necessary for the sustainability of the national economy.

As the result of the analysis carried out, it has been found out that the green economy model in Russia is developing in the traditional directions with due account of the national specifics. In the Russian context the focus is made on the models of corporate social responsibility and new behavioral models of consumers. The paper emphasizes a significant influence of non-financial reporting on the competitiveness of businesses mainly because environmental ratings are considered when evaluating a company's reliability. The ratings exert a significant impact on the cost of resource attraction. In the green economy model the role of public environmental control on the regional level is increasing.

Keywords: green economy, green growth, ecological modernization, sustainable development, corporate social responsibility, behavioral model of a socially responsible consumer.

Вызовами современного мира стали серьезные изменения климата и возросший до предельных значений уровень антропогенной нагрузки на экосистему, что стимулирует международное сообщество к активному поиску новой парадигмы развития. Одним из таких проявлений стал новый тренд в построении экономических моделей государства, компании, бизнеса и общества - это зеленая экономика. Понятие зеленой экономики очень широко трактуется в последнее время и охватывает разнообразные сферы взаимодействия государства, бизнеса и общества (НИФИ, 2016; Хуторова, 2014).

Целью настоящей работы стало выявление основных трендов развития «зеленой» экономики в России и их перспективы, что приобретает особую актуальность в условиях перманентной нестабильности и геополитической напряженности. Зеленая экономика - это особый тип развития экономики, при котором основной целью остается повышение благосостояния людей при соблюдении социальной справедливости в условиях снижения антропогенной нагрузки на экосистему. Зеленую экономику необходимо рассматривать в контексте борьбы с глобальным изменением климата и перспективного направления преодоления нищеты, а также как возможность борьбы с перманентной нестабильностью развития мировой экономики и глобальных финансовых рынков (Хуторова, 2014).

Российская Федерация традиционно принимает активное участие в международных инициативах, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду, в рамках перехода к зеленой экономике. В 2016 году Россия подписала Парижское соглашение¹, ратификация которого намечена на 2019 год, и в настоящее время идут активные консультации в профессиональном сообществе, цель которых - поиск наиболее эффективных методов и инструментов «озеленения экономики» (Российская газета, 2016; Рамочная конвенция..., 2015). Процессы уже запущены, происходит формирование системы основополагающих и программных документов, которые фактически могут служить базисом построения зеленой экономики в России, среди которых необходимо отметить следующие:

1. Стратегия экономической безопасности РФ на период до 2030 года, подписанная Президентом России в 2017 году, где отмечается необходимость комплексного развития энергетической инфраструктуры, внедрения перспективных энергоэффективных технологий, повышения эффективности переработки энергоресурсов и диверсификации направлений их экспорта с учетом мировых тенденций перехода на низкоуглеродную экономику (Стратегия..., 2017) .
2. Стратегия экологической безопасности, подписанная Президентом РФ в 2017 году, в соответствии с которой стратегической целью государственной политики в области экологического развития является решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, реализации права каждого человека на благоприятную окружающую среду, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности (Стратегия..., 2017).
3. Распоряжение Правительства РФ от 18.12.2012 № 2423-р «Об утверждении Плана действий по реализации Основ государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г.», где предусмотрено развитие системы национальной стандартизации в области охраны окружающей среды с учетом международных экологических стандартов (Распоряжение Правительства РФ..., 2012).
4. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики». утвержденная Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 с объемом бюджетных ассигнований из федерального бюджета в размере 14,15 млрд рублей. Программа содержит 68 целевых показателей и ожидаемых результатов в период с 2013 по 2020 гг., среди которых в рамках данной работы особый интерес представляют:
 - наращивание глубины переработки нефтяного сырья с 71,6 до 85%;
 - увеличение доли моторных топлив экологического класса 5 с 40,6 до 90,8%;
 - сокращение потерь электроэнергии в электрических сетях с 11,6 до 8,8%;

¹Парижское соглашение было принято всеми 196 сторонами Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКООНИК) на 21-й Конференции сторон РКООНИК, подписано 12.12. 2015 года

- снижение величины удельного выброса загрязняющих веществ в атмосферу на 8,8% (до 2,9 кг на 1 т добычи угля);
- снижение энергоемкости ВВП на 9,41% (Постановление Правительства РФ..., 2014; Государственная программа...).

5. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 N 84. Стратегия содержит ряд целевых показателей и ожидаемых результатов на период с 2018 по 2030 гг., среди которых в рамках данной работы особый интерес представляют:

- увеличение доли утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов с 59,6% в 2016 году до 86% к 2030 году;
- увеличение доли твердых коммунальных отходов (ТКО), направленных на обработку, в общем объеме отходов, вывезенных с мест накопления с 8,9 до 80% соответственно;
- нарастающий ежегодный темп снижения образования отходов на 3,7% к 2030 году;
- снижение доли импорта оборудования для обработки, утилизации и обезвреживания отходов с 60 до 10% к 2030 году (Стратегия экологической безопасности, 2017).

6. Концепция развития публичной нефинансовой отчетности, утвержденная Распоряжением Правительства РФ 5 мая 2017 г. № 876-р, в которой отмечено, что публичная нефинансовая отчетность является важным элементом системы управления, в том числе рисками, и развития коммуникаций с заинтересованными сторонами, предпосылкой повышения эффективности и укрепления конкурентоспособности организаций (Концепция развития публичной нефинансовой отчетности..., 2017).

Создан также ряд нормативных документов на региональном уровне для поэтапного достижения стратегических целей, обозначенных в вышеперечисленных документах. В настоящее время пока остается достаточно сложной задачей проведения оценки прогресса «озеленения» экономики, методическая база еще только создается, причем специфика оценки зависит не только от страны, а еще и от региона и его социально экономического и географического профиля, системы статистического учета в стране. Наиболее распространенной методикой оценки могут являться разработанные ОЭСР² 26 зеленых индикаторов, разбитых на 4 группы, которые отражают прогресс в построении зеленой экономики, среди них:

- 1) экологичность и эффективность использования природных ресурсов и энергоэффективность экономики;
- 2) обеспеченность природными ресурсами;
- 3) экологичность условий проживания, отражающих качество жизни населения;
- 4) экономические возможности и ответные меры в области политики (Зеленые индикаторы, 2016).

Оценка текущего состояния уровня экологичности и эффективности использования природных ресурсов и энергоэффективность экономики проводится на основе анализа динамических рядов в части таких показателей, как энергоемкость, углеродоемкость, динамика потребления чистой воды, динамика образования твердых коммунальных отходов и т.п., источниками информации служат статистические отчеты международных организаций, данные Росстата РФ, профильных ведомств и общественных организаций.

В целом по миру, в результате целенаправленных действий по переходу к зеленой экономике, мероприятия по повышению эффективности использования энергии позволили добиться сокращения потребления энергии на 3,1 гигатонн нефтяного эквивалента и предотвратили выбросы парниковых газов (ПГ) на 7 гигатонн в период 2000-2014 гг., что отражает позитив-

²Организация экономического сотрудничества и развития

ные тенденции на макроэкономическом уровне. Важным достижением можно считать планомерное снижение общего уровня энергоемкости и углеродоемкости мировой экономики (WEF, 2017).

К сожалению, пока энергоёмкость российской экономики почти в 3 раза превышает усредненный показатель энергоемкости стран ЕС, т.е. на 1 единицу произведенной продукции в России расходуется в 3 раза больше энергоресурсов. В 2017 году индекс энергоемкости ВВП³ вырос на 2,8% и составил 0,21 при среднемировом показателе 0,116 (Сафонов, Стеценко, 2016), что отражает, с одной стороны, слабый прогресс в процессе перехода к зеленому росту экономики России и характеризует страну как высокоэнергоемкую, а с другой стороны - достаточную субъективность данной оценки, в особенности принимая во внимание специфику российской модели экономики в условиях продолжающейся девальвации курса рубля. В то же время Минэнерго РФ дает более позитивные данные, так в 2015 году энергоемкость ВВП России по отношению к 2007 году снизилась на 7,5%, в том числе на 5,94% за счет реализации Государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики». В 2016 году снижение энергоемкости ВВП за счет мероприятий Госпрограммы составило 7,04% вместо запланированных 5,68% (Снижение энергоемкости ВВП). Но достигнутые результаты даже по самым оптимистичным данным пока не превышают 19% от целевого уровня (Энергетический бюллетень..., 2017).

В России самый высокий потенциал повышения эффективности использования ресурсов принадлежит проектам, направленным на повышение энергоэффективности, применение энергосберегающих технологий может снизить расход энергоресурсов в стране на 40-48%. Около трети этого потенциала экономии имеют отрасли ТЭК, порядка 30% приходится на обрабатывающую промышленность и строительство, свыше 25% – на коммунально-бытовой сектор (Стратегия..., 2017).

Следующим важным индикатором зеленого роста заслуженно считается углеродоемкость, или карбоноемкость, ВВП⁴. Россия занимает 4-е место в мире по выбросам CO₂ с долей около 5% (1,69 млрд т в 2017 году). Тройка лидеров выглядит так: Китай с долей 27,6% от совокупного объема выбросов CO₂, США – 15,2% и Индия – 7,0%. Карбоноемкость Российской экономики остается на очень высоком уровне - 0,481, что на 80% выше показателя в среднем по миру в 2017 году (Экологический рейтинг, 2018; Показатели..., 2018). С 2010 года в России объемы выбросов ПГ без учета землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) сохраняются на отметке от 2,6 до 2,7 млрд т CO₂- экв. с учетом от 1,7 до 2,1 млрд т CO₂-экв. В 2016 году большую часть выбросов ПГ обеспечил энергетический сектор с долей 82,3% (Экология и экономика, 2018). Совокупный объем выбросов загрязняющих веществ и абсорбции, связанных с ЗИЗЛХ в 2017 году, вырос на 1,5% и составил 1,69 млрд т CO₂-экв (51,6% эмиссии 1990 года), при этом удельные выбросы в 2017 году в среднем по России составили 11,6 т CO₂ на человека, а объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу только от автомобильного транспорта составил 98,4 кг/чел (Экологический рейтинг..., 2018; Выбросы CO₂..., 2018). В динамике выбросов ПГ в России в период 1990-2016 гг. произошли существенные изменения. Так, общий объем выбросов с учетом ЗИЗЛХ сократился на 48,4%. В разрезе ситуация выглядит следующим образом: эмиссия ПГ от энергетики упала на 28,6 %, от предприятий промышленности – на 22,9%, от сельского хозяйства – на 58,6%, а вот выбросы от формирования и хранения отходов, напротив, выросли на 42,6%. Динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников и годовой индекс промышленного производства в России находятся в тесной взаимо-

³Энергоемкость ВВП в рамках данной работы рассчитывается как отношение совокупного потребления энергии в 1 единице нефтяного эквивалента к 1 единице ВВП в долларах США по ППС 2015 года.

⁴Углеродоемкость или карбоноемкость рассчитывается как совокупный объем эмиссии CO₂ эквивалента к 1 единице ВВП в долларах США по ППС 2015 года.

связи, и отрадно отметить, что темпы роста промышленного производства в 2017 году вдвое превысили темпы роста эмиссии CO₂. Объемы выбросов сильно разнятся по регионам, наиболее существенный вклад в увеличение выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в 2000–2017 годах внесли сырьевые экспортно-ориентированные и средне-развитые регионы, где присутствуют компании крупного бизнеса (Экологический рейтинг ..., 2018).

Еще одним важным индикатором состояния экосистемы, отражающим прогресс в построении зеленой экономики, является *динамика забора воды* из природных водных объектов для использования. В период с 2000 по 2016 годы данный показатель сократился с 75,9 до 61,3 млрд м³, при этом сброс загрязненных сточных вод уменьшился с 20,3 до 14,7 млрд м³ (Российский статистический ежегодник. 2017; 22).

В международных программах (соглашениях) растет значимость такого показателя, как *сток отходов производства и потребления*. В России в период с 2000 по 2106 гг. этот показатель вырос почти **в 43 раза** (с 127,5 до 5441,3 млн т) (Российский статист. ежегодник, 2017). Это показательный пример работы «экономики потребления» и серьезных проблем в сфере утилизации отходов и рециклинга. В среднем в России ежегодно образуется около 3,5 млрд т отходов, 16% из которых приходится на твердые коммунальные отходы (ТКО). В настоящее время утилизируется только 10% из них (3% сжигается, 7% поступает в промышленную переработку) и около 90% (более 35 млн т мусора) вывозится на мусорные полигоны с целью захоронения (Обзор рынка ..., 2017). Эта проблема приобрела огромное значение для оценки условий проживания, отражающих качество жизни населения, и негативным образом отражается на социально-экономическом профиле регионов и всей страны в целом. Проблемы нашли отражение в Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года.

Сегодня по итогам инвентаризации территорий выявлено 340 объектов накопленного вреда окружающей среде, являющихся источником потенциальной угрозы жизни и здоровью 17 млн человек. Растет доля отходов, не вовлеченных во вторичную переработку, что приводит к стремительно нарастающему выводу продуктивных сельскохозяйственных угодий из оборота (Стратегия, 2017). К тому же фактически пока невозможно объективно оценить объем ТБО, т.к. нет единого реестра и значительная часть мусора складывается на «незаконных» свалках. Работа в этом направлении ведется, потенциал же переработки отходов колоссален и имеет высокую экономическую эффективность и может генерировать существенные доходы для владельцев предприятий и существенно улучшить качество жизни населения, помочь сформировать поведенческую модель ответственного потребителя. Реализация Стратегии только в области переработки макулатуры позволит нарастить мощности по переработке с 3076 до 8100 тыс. т к 2030 году, что поможет достичь экономии древесины до 40,5 млн м³, уровень замещения по древесине с 7,3 до 12,7%, экономии потребления лесных ресурсов до 251,1 млн единиц деревьев, экономии потребления воды почти в 3 раза на 1620 млн м³ и снизить потребление электроэнергии на 32,4 млрд кВт·час (Стратегия, 2017).

Важнейшим индикатором зеленого роста, влияющим на качество жизни населения, является динамика изменения *площади и качества лесов*, где происходит абсорбция CO₂ и депонирование углерода (Курбанов, 2007; Курбанов и др., 2008). Первостепенными задачами в этом направлении являются совершенствование системы противодействия лесным пожарам и тотальный переход на принципы устойчивого ведения лесного хозяйства (Воробьев, Курбанов, 2017). Важную роль играет охват внедрения добровольных международных стандартов экологической ответственности и энергоэффективности, таких как лесная (FSC), морская (MSC) сертификация, «зеленые стандарты», сертификация домостроения (LEED, BREAM и др.) (Доклад о человеческом развитии в РФ, 2017). В России разработана Национальная си-

стема лесной сертификации (РНСЛС), направленная на оценку ведения лесного хозяйства и лесопользования, включая отслеживание прохождения лесных ресурсов и продуктов (услуг), вовлекаемых в процесс лесной сертификации от мест их заготовки до конечного потребителя (Экологический рейтинг ..., 2017). Сегодня, по оценкам ОЭСР, в России доля лесов, где внедрена интенсивная модель устойчивого ведения лесного хозяйства, находится почти на уровне погрешности около 3%, в то время как в Финляндии доля таких лесов почти 100% (Курбанов, Воробьев, 2014). Назрела необходимость включения требований соответствия природопользования международным экологическим стандартам при проведении аукционов и конкурсов на право ресурсопользования при продлении аренды лесных участков в целях лесопользования, что также стимулирует трансформацию экономики на «зеленые рельсы».

В процессе перехода на зеленый рост основная роль отводится развитию государственно-частного партнерства, в результате которого появляется возможность реализации экономических возможностей для бизнеса, государства и общества. Основной груз ответственности в проектах по повышению эффективности использования ресурсов и снижения негативного воздействия на экосистему возлагается в первую очередь на крупный и средний бизнес. Именно компании в рамках развития моделей корпоративной социальной ответственности (КСО)⁵ и проектов целевых экологических инвестиций реализуют инициативы государства и запросы общества. Такие проекты требуют существенных и длинных вложений, что в условиях перманентной нестабильности российской экономики вызывает серьезные затруднения и заставляет совершенствовать модели корпоративной социальной ответственности, создавать и развивать все новые способы привлечения ресурсов и страхования рисков. Одним из инструментов КСО во всем мире стала практика нефинансовой отчетности.

В России практика составления нефинансовых отчетов пока еще слабо развита, согласно исследованию (рейтингу) корпоративной прозрачности крупнейших российских компаний 2017 года, в выборку которого входит уже более 900 компаний, только 48 компаний раскрывают информацию о своей деятельности на уровне международных практик, то есть с учётом требований таких стандартов, как GRI (Global Reporting Initiative) и IR (integrated reporting) (Стандарт социальной отчетности ..., 2018). Нефинансовая отчетность способна оказывать существенное влияние на состояние компании, речь идет о возможности и стоимости привлеченных ресурсов, возможности доступа на глобальные рынки для реализации своей продукции, об отношениях с государством в части предоставления преференций или налоговых льгот и о восприятии компании обществом в плане формирования социально ответственных поведенческих моделей.

Серьезным достижением в процессе перехода к зеленой экономике можно считать формирующуюся практику составления рейтингов экологической открытости различных отраслей отечественной экономики. Отраслевой рейтинг экологической открытости – эффективный инструмент повышения корпоративной ответственности компаний и создания эффективных механизмов обратной связи отрасли с заинтересованными сторонами. В 2017 году силами Всемирного фонда дикой природы (WWF) был составлен рейтинг экологической открытости целлюлозно-бумажных компаний лесного сектора России. Для расчета рейтинга используются группы показателей, таких как: доля использованного сырья из ответственных источников, уровень экологичности производства, уровень развития экологического менеджмента, прозрачность и отчетность компании. Пока в рейтинге на добровольной основе приняли участие лишь 10 компаний ЦБК ЛС РФ, но в перспективе их будет больше. Целесообразно оценивать также энерго- и ресурсоэффективность компаний и стратегическое корпоративное планирование в этой сфере (Костенко, Воропаев, 2018).

⁵Подход к пониманию социальной ответственности как ответственности перед обществом, ее связи с устойчивым развитием выражен в международном стандарте ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности». В РФ в 2012 году утвержден и введен в действие идентичный стандарт ГОСТ Р ИСО 26000-2012.

Существенное наращивание усилий компаний в области КСО в проекты энерго- и ресурсосбережения определяет основной тренд развития зеленой экономики в России.

В процессе перехода к зеленой экономике ключевую роль играют инвестиции в инновационные и экологичные технологии, позволяющие провести экологическую модернизацию, за счет чего и будут улучшаться качественные показатели зеленого роста. В настоящее время мы имеем катастрофический уровень износа основных производственных фондов - 48%, что также обуславливает высокую энерго- и карбоноёмкость российской экономики, тем самым снижая ее конкурентоспособность.

Для качественного прорыва в развитии экономики критически важно финансирование проектов НИОКР, доля которых должна быть не менее 3-4% ВВП, именно поэтому в оценке прогресса зеленого роста этому показателю уделяется особое внимание. В 2016 году в России расходы на НИОКР составили только 1,1% ВВП, что явно недостаточно для прорыва. Лидерами по данному показателю являются Израиль (4,25%), Республика Корея (4,23%) и Швейцария (3,42%). В абсолютных значениях расходы на НИОКР в России составили 37,3 млрд долларов, что почти в 15 раз ниже, чем в США, которые занимают 1-е место в мире, и в 11 раз меньше, чем у Китая (Курбанов, Воробьев, 2014).

В России в среднем в последние годы только около 2% от государственных расходов на НИОКР идут на финансирование проектов, нацеленных на переход к зеленой экономике. Программы НИОКР, нацеленные на принципы зеленой экономики, финансируются за счёт бюджетных и внебюджетных средств, причем основная доля должна поступать из корпоративных источников, что будет способствовать повышению эффективности использования средств в рамках государственно-частного партнерства и обеспечивать более быстрое применение результатов на практике. Пока мы видим в динамике, что российские разработки в области защиты окружающей среды активно патентуются: так, в 2013 году Россия занимала 3-е место в мире с долей в 3%, но только 0,5% от мирового рынка составила доля запатентованных российских разработок в области зеленого роста, которые нашли применение в технологических процессах на производстве (Зеленые индикаторы ..., 2016).

В рамках мероприятий Программы по приоритетному направлению «Рациональное природопользование» в период 2007-2013 гг. было выделено бюджетное финансирование НИОКР в размере 9,68 млрд руб., софинансирование из внебюджетных источников НИОКР, составило 8,77 млрд руб. (Курбанов, 2007). В 2012 году на проекты НИОКР, связанные с повышением эффективности использования энергии и рациональным природопользованием, было потрачено 106,6 млрд руб.: 75,06 и 31,57 млрд руб. соответственно. Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, в период 2000-2016 гг. выросли в 6,5 раз, с 22,33 млрд руб. до 139,67 млрд руб. в текущих ценах, причём половина всех средств (67,47 млрд руб.) в 2016 году пошла на охрану и рациональное использование водных ресурсов (Российский статистический ежегодник ..., 2017).

В условиях обострения геополитической напряженности, антироссийских санкций, закрытия внешних источников фондирования проблемы привлечения капитала приобретают особое значение. Государство вынуждено мобилизовать внутренние источники для реализации инвестиционных программ, в связи с этим создаются специальные корпорации развития, разрабатываются инвестиционные программы. Примером может стать инициатива государства о «добровольно принудительном» инвестировании «дополнительных»⁶ доходов бизнеса в общественно важные проекты. Со стороны государства для бизнеса на срок действия проектов будут заморожены действующие условия в части налоговых льгот, обязательных платежей, лицензирования и сертификации, использования природных ресурсов и охраны окружа-

⁶Дополнительные доходы, полученные компаниями-экспортерами в результате девальвации рубля.

ющей среды, таможенных правил. Для реализации проектов по повышению эффективности использования ресурсов требуются существенные вложения, часть которых может быть мобилизована на рынке зеленых облигаций или инфраструктурных облигаций, которые уже широко используются на мировых финансовых рынках. Под «зелеными» облигациями понимают широкий класс долговых ценных бумаг с фиксированным доходом, выпускаемых эмитентом на длительный срок для финансирования проектов по охране окружающей среды, борьбе с изменением климата и рациональному использованию природных ресурсов. Эмитентом могут быть международные финансовые организации или компании и корпорации, формирующие нефинансовую отчетность, также могут выпускаться муниципальные зеленые облигации. «Зеленые» облигации содержат точно такие же параметры риска, ценообразования и доходности, как и прочие корпоративные облигации, могут быть инструментами инвестиций пенсионных фондов. Средства, привлеченные от размещения «зеленых» облигаций, могут направляться исключительно на цели устойчивого развития, которые были определены ООН и приняты государствами-членами в 2015 году. Контроль за распределением средств компании в случае выпуска «зеленых» ценных бумаг может осуществляться только с помощью нефинансовой отчетности.

Необходимо отметить рост влияния общественности и общественных организаций на состояние окружающей среды. В этой связи вызывает интерес инициатива общественной организации «Зелёный патруль» в области формирования и публикации экологических рейтингов субъектов РФ. Экологический рейтинг формируется на основе информационных материалов, полученных из различных источников, отражающих текущее состояние окружающей среды в регионе путем аккумулирования в банке данных информационно-аналитической системы значимых как негативных, так и позитивных событий с учетом присвоения веса в сводном экологическом индексе. Базой для расчета служат группы индексов: природоохранный, промышленно-экологический и социально-экологический. К примеру, рейтинг Москвы во 2 квартале 2017 года выглядел так: 7-е место, значение сводного индекса 55/45. Числовое значение индекса - это накопленное ранее и за расчетный период количество положительных и отрицательных оценок. Лидером в том рейтинге стала Тамбовская область с индексом 67/33, а замыкает рейтинг Свердловская область с индексом 35/65 (Затраты на науку, 2007;10). В результате формирования рейтингов будет возможно выявление долгосрочных тенденций в изменении экологического следа региона. Такого рода рейтинги стимулируют региональные власти и представителей крупного бизнеса более внимательно относиться к своим экологическим программам и развивать кооперацию между бизнесом и властью.

Выводы. Таким образом, можно констатировать, что в России идет трансформация экономики на зеленый рост по основным направлениям:

1. Формируется и актуализируется система основополагающих и программных документов, которые фактически могут служить базисом построения зеленой экономики в России.
2. Выявлен отчетливый тренд повышения эффективности использования природных ресурсов. Реализуются комплексные программы экологической модернизации, направленные на снижение энергоемкости и карбоноемкости экономики, развитие промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления, в результате реализации которых будут получены экономические, социальные и экологические выгоды, способствующие устойчивому развитию российской экономики.
3. Происходит развитие моделей КСО бизнеса с акцентом на создание благоприятной экологической обстановки и повышение качества жизни населения в регионе ведения хозяйственной деятельности, реализуются социально значимые проекты в рамках государственно-частного партнерства.

4. Растет влияние нефинансовой отчетности на уровень конкурентоспособности компаний как на мировом, так и национальном рынках. Экологические рейтинги включены в систему оценки надежности компании и оказывают существенное влияние на стоимость привлечения ресурсов.
5. Постоянно расширяется список финансовых инструментов и методов для мобилизации распределения и использования финансовых ресурсов в рамках построения зеленой экономики. Нефинансовые факторы включаются в кредитные рейтинги компании и государства, что стимулирует развития кластера зеленых финансовых инструментов, в том числе: кредитов, ценных бумаг, налогов, платежей за негативное воздействие на экосистему, инструментов страхования экологических рисков.
6. Растет влияние общественного контроля за экологической обстановкой в регионах. Формируется практика составления экологических рейтингов субъектов РФ.
7. Происходит трансформация поведенческих моделей социально ответственного потребителя.

В целом российская модель зеленой экономики формируется по традиционным направлениям с учетом национальной специфики, в процессе реализации комплексных программ, направленных на повышение эффективности использования ресурсов и улучшение качества жизни населения, где основные роли будут играть постоянно совершенствующиеся модели социально ответственного бизнеса и формирующиеся под воздействием новых трендов развития общества и роста значимости общественных организаций новые поведенческие модели потребителя, основанные на социальной и экологической ответственности индивидуума.

Библиографический список

1. Green Growth Indicators 2017 OECD, 2017 <http://www.oecd.org/env/green-growth-indicators-2017-9789264268586-en.htm>
2. World Energy Perspectives Energy efficiency policies 2016 <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/EnergyEfficiencyAStraightPathFullReport.pdf>
3. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
4. Выбросы CO₂ на душу населения. Информационный ресурс Всемирного Банка CO₂ emissions (metric tons per capita) [Электронный ресурс]. – <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC.world>
5. ВЭБ Банк развития. Интеграция принципов устойчивого развития в деятельность финансовых институтов развития. [Электронный ресурс]: информационно-аналитический материал. – Режим доступа: <http://www.veb.ru/common/upload/files/veb/analytics/sd/2014kso.pdf>
6. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики»: постановление Правительства РФ от 15.04.2014 N 321 (ред. от 30.03.2018) "Об утверждении государственной программы РФ "Энергоэффективность и развитие энергетики" http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/
7. Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики» <https://minenergo.gov.ru/node/323> file:///C:/Users/%D0%9D%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%8F/Downloads/GP_30_v_redakcii_ot_30032018.pdf
8. Доклад о человеческом развитии в РФ за 2017 год / под ред. С. Н. Бобылева и Л. М. Григорьева. — М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2017. 292 с. <http://ac.gov.ru/files/publication/a/15600.pdf>
9. Ежегодный мониторинг средств, выделенных из ФБ на финансирование НИОКР (в том числе по приоритетным направлениям инновационного развития России) <http://ac.gov.ru/files/attachment/4879.pdf>
10. Затраты на науку в России и ведущих странах мира. ВШЭ. сентябрь 2007г. https://issek.hse.ru/data/2017/09/07/1172519569/NTI_N_64_0709_2017.pdf
11. Концепция развития публичной нефинансовой отчетности, утвержденная распоряжением Правительства РФ 5.05.2017г. № 876-п. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/ad55a6fdb3e6ec41145acfe3913f065f23da5c5/
12. Костенко А.В., Воропаев А.И., Шматов Н.М., Тугова К.В (WWF России). – Москва, Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. – 12 с., Рейтинг экологической открытости целлюлозно бумажных компаний лесного сектора России 2017 <https://wwf.ru/what-we-do/forests/ekologicheskij-rejting-rossijskikh-kompaniy-tsellyulozno-bumazhnogo-sektora/>
13. Курбанов, Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие. рекомендовано УМО по образованию в области лесного дела / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
14. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – №3. – С. 5-17.

15. Курбанов, Э.А. Углерододепонирующие насаждения Киотского протокола/ Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2007. – 184 с.
16. О результатах выполнения НИОКР по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в РФ при реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».
17. Обзор рынка сбора и переработки отходов <https://www.openbusiness.ru/biz/business/obzor-rynka-sbora-i-pererabotki-otkhodov/>
18. Показатели углеродоемкости мировой экономики [https://globaldata.enerdata.net/mapping-tool/generic/co2pib\\$xxp.html](https://globaldata.enerdata.net/mapping-tool/generic/co2pib$xxp.html).
19. Развитие электрического транспорта в России и мире. Энергетический бюллетень 52, сентябрь 2017г. Аналитический центр при Правительстве РФ <http://ac.gov.ru/files/publication/a/14460.pdf>
20. Рамочная конвенция об изменении климата Принятие Парижского соглашения. режим доступа <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>
21. Распоряжение Правительства РФ от 18.12.2012 N 2423-р «Об утверждении Плана действий по реализации Основ государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г.» http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139460/0738e49b480ecbc880af56147db35ac2fc4c68a7/
22. Российский статистический ежегодник. 2017" / "Russian statistical yearbook. 2017" rus/eng (онлайн, pdf, rar) <https://nangs.org/analytics/rosstat-rossijskij-statisticheskij-ezhegodnik-2017-russian-statistical-yearbook-2017-rus-eng-onlajn-rar>
23. Россия подписала Парижское соглашение по климату Российская газета от 22.04.2016г режим доступа <https://rg.ru/2016/04/22/rossija-podpisala-parizskoe-soglashenie-po-klimatu.html>.
24. Сафонов Г.В, А.В.Стеценко, А.Л.Дорина, С.Л.Авалиани, Ю.А.Сафонова, Д.С.Беседовская Стратегия низко-углеродного развития России АНО Центр экологических инноваций (2016).
25. Снижение энергоемкости ВВП <https://minenergo.gov.ru/node/441>
26. Состояние глобальной энергетической системы <https://www.enerdata.net/system/files/publications/global-energy-trends-2018-edition-enerdata.pdf>
27. Сравнительный анализ механизмов финансирования «зелёных» и «грязных» инвестиционных проектов. Аналитическая записка НИР 23 «Зелёное» финансирование как механизм финансовой поддержки инвестиционной деятельности в целях обеспечения сбалансированного и устойчивого роста: возможности для России» ФГБУ «Научно-исследовательский финансовый институт» (НИФИ) М.2016г. <https://investinfra.ru/frontend/images/PDF/minfin-green-docs/minfin-green-docs-17.pdf>
28. Стандарт социальной отчетности GRI (Global Reporting Initiative) [Электронный ресурс]: Интернет-сайт инициативы по отчетности. Режим доступа: <https://www.globalreporting.org/Pages/default.aspx>
29. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>
30. Стратегия экологической безопасности Указ президента РФ О Стратегии экологической безопасности РФ на период до 2025 года от 19.04.2017г. Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41879> Указ Президента РФ от 19.04.2017 N 176 "О Стратегии экологической безопасности РФ на период до 2025 года" http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_215668/
31. Стратегия экономической безопасности РФ на период до 2030 года, подписанную Президентом России в 2017 году. Указ Президента РФ от 13.05.2017 N 208 "О Стратегии экономической безопасности РФ на период до 2030 года" http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216629/
32. Хуторова Н.А. Зеленая экономика как инструмент стимулирования экономического роста. М: ОУП ВО «Труд и социальные отношения» № 10 2014г. с. 35-45 режим доступа http://id.atiso.ru/files/tiso_10_2014.pdf
33. Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов российской академии наук (цэпл ран) Актуальные проблемы национальной лесной политики 2016 <http://ekollog.ru/centr-po-problemam-ekologii-i-produktivnosti-lesov-rossijskoj.html?page=6>
34. Экологический рейтинг субъектов РФ. Итоги лета 2017 года <http://www.greenpatrol.ru/en/node/292731>
35. Экология и экономика: рост загрязнения атмосферы страны. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики 39, июль 2018г. Аналитический центр при Правительстве РФ <http://ac.gov.ru/files/publication/a/17409.pdf>

References

1. Green Growth Indicators 2017, available at: <http://www.oecd.org/env/green-growth-indicators-2017-9789264268586-en.htm>, 2017.
2. World Energy Perspectives Energy efficiency policies 2016, available at: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/EnergyEfficiencyAStraightPathFullReport.pdf>, 2016.
3. Vorobiev, O.N. Distancionnyj monitoring vosstanovitel'noj dinamiki rastitel'nosti na garyah Marijskogo lesnogo Zavolzh'ya (Remote monitoring of the restorative dynamics of vegetation on the burned areas of the Mari forest Volga region), O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017. Vol. 2, No. 14, Pp. 124-134.
4. Vybrosy CO₂ na dushu naseleniya (CO₂ emissions per capita) [Elektronnyj resurs]. *Informacionnyj resurs Vsemirnogo Banka*, <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PCworld>.
5. VEB Bank razvitiya. Integraciya principov ustojchivogo razvitiya v deyatel'nost' finansovyh institutov razvitiya (VEB Development Bank. Integration of sustainable development principles into the activities of financial development institutions), available at: <http://www.veb.ru/common/upload/files/veb/analytics/sd/2014kso.pdf>

6. Gosudarstvennaya programma "Jennergoeffektivnost' i razvitie jenergetiki" (State program "Energy Efficiency and Energy Development"), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/, 30.03.2018.
7. Gosudarstvennaya programma RF "Jennergoeffektivnost' i razvitie jenergetiki" (State Program of the Russian Federation "Energy Efficiency and Energy Development"), available at: https://minenergo.gov.ru/node/323_file:///C:/Users/%D0%9D%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%8F/Downloads/GP_30_v_redakcii_ot_30032018.pdf
8. Bobyleva, S. N. Doklad o chelovecheskom razvitii v RF za 2017 god (Human Development Report 2017 in the Russian Federation), S. N. Bobyleva, L. M. Grigor'eva, Moscow, available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/15600.pdf>, 2017.
9. Ezhegodnyj monitoring sredstv, vydelennyh iz FB na finansirovanie NIOKR, v tom chisle po prioritetnym napravleniyam innovacionnogo razvitiya Rossii (Annual monitoring of funds allocated from the FB to finance NIOKR, including in priority areas of innovative development of Russia), available at: <http://ac.gov.ru/files/attachment/4879.pdf>
10. Zatratty na nauku v Rossii i vedushchih stranah mira (The cost of science in Russia and the leading countries of the world), available at: https://issek.hse.ru/data/2017/09/07/1172519569/NTI_N_64_0709_2017.pdf, 09.2007.
11. Koncepciya razvitiya publichnoj nefinansovoj otchetnosti, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva RF (The concept of development of public non-financial reporting, approved by order of the Government of the Russian Federation), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/ad55a6fdb3e6ec41145acfe3913f065f23da5c5/, 5.05.2017.
12. Kostenko, A.V. Vsemirnyj fond dikoj prirody (World Wildlife Fund), A.V. Kostenko, A.I. Voropaev, N.M. Shmatkov, K.V. Tugova, available at: <https://wwf.ru/what-we-do/forests/ekologicheskij-rejting-rossijskikh-kompaniy-tsellyulozno-bumazhnogo-sektora/>, 2018.
13. Kurbanov, E.A. Lesovodstvo. Mezhdunarodnoe lesnoe hozyajstvo (Forestry. International Forestry), E.A. Kurbanov, O.N. Vorobiev, Joshkar-Ola, 2014, 254 p.
14. Kurbanov, E.A. K voprosu ob uglerododeponiruyushchih nasazhdeniyah (On the issue of carbon deposition), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'yov, L.S. Moshkina, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, S.A. Nezamaev, *Vestnik MarGTU*, Joshkar-Ola, 2008, No. 3, Pp. 5-17.
15. Kurbanov, E.A. Uglerododeponiruyushchie nasazhdeniya Kiotskogo protokola (Kyoto Protocol carbonaceous plantations), E.A. Kurbanov, Joshkar-Ola, 2007, 184 p.
16. O rezul'tatah vypolneniya NIOKR po prioritetnym napravleniyam razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologij v RF pri realizacii FCP «Issledovaniya i razrabotki po prioritetnym napravleniyam razvitiya nauchno-tekhnologicheskogo kompleksa Rossii na 2007-2013 gody» (On the results of research and development in priority areas of science, technology and technology in the Russian Federation during the implementation of the Federal Target Program "Research and development in priority areas of the Russian scientific and technological complex for 2007-2013").
17. Obzor rynka sbora i pererabotki othodov (Overview of the waste collection and recycling market), available at: <https://www.openbusiness.ru/biz/business/obzor-rynka-sbora-i-pererabotki-otkhodov/>
18. Pokazateli uglerodoemkosti mirovoj ehkonomiki (Indicators of carbon intensity of the world economy), available at: [https://globaldata.enerdata.net/mapping-tool/generic/co2pib\\$xxp.html](https://globaldata.enerdata.net/mapping-tool/generic/co2pib$xxp.html).
19. Razvitie ehlektromobil'nogo transporta v Rossii i mire. Jenergeticheskij byulleten' (The development of electric vehicles in Russia and the world. Energy Bulletin), available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/14460.pdf>, 09.2017.
20. Ramochnaya konvenciya ob izmenenii klimata Prinyatie Parizhskogo soglasheniya (Framework Convention on Climate Change Adoption of the Paris Agreement), available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>
21. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 18.12.2012 N 2423-r "Ob utverzhdenii Plana dejstvij po realizacii Osnov gosudarstvennoj politiki v oblasti jekologicheskogo razvitiya RF na period do 2030" (Order of the Government of the Russian Federation of December 18, 2012, No. 2423-r "On the approval of the Action Plan for the implementation of the Fundamentals of the State Policy in the Field of Ecological Development of the Russian Federation until 2030"), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139460/0738e49b480ecbc880af56147db35ac2fc4c68a7/
22. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik (Russian statistical yearbook), available at: <https://nangs.org/analytics/rosstat-rossijskij-statisticheskij-ezhegodnik-2017-russian-statistical-yearbook-2017-rus-eng-onlajn-rar>, 2017.
23. Rossiya podpisala Parizhskoe soglasenie po klimatu (Russia signed the Paris Climate Agreement), *Rossiyskaya gazeta*, 2016, <https://rg.ru/2016/04/22/rossiia-podpisala-parizhskoe-soglasenie-po-klimatu.html>.
24. Safonov, G.V. Besedovskaya Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Rossii ANO Centr ehkologicheskikh innovacij (Besedovskaya Strategy for Low-Carbon Development of Russia Autonomous Non-Profit Organization Center for Environmental Innovation), G.V. Safonov, A.V. Stecenko, A.L. Dorina, S.L. Avaliani, Yu.A. Safonova, 2016.
25. Snizhenie ehnergoemkosti VVP (Reduced energy intensity of GDP), available at: <https://minenergo.gov.ru/node/441>
26. Sostoyanie global'noj jenergeticheskoy sistemy (The state of the global energy system), available at: <https://www.enerdata.net/system/files/publications/global-energy-trends-2018-edition-enerdata.pdf>
27. Sravnitel'nyj analiz mekhanizmov finansirovaniya "zelyonyh" i "gryaznyh" investicionnyh proektov. Analiticheskaya zapiska NIR 23 "Zelyonoe" finansirovanie kak mekhanizm finansovoj podderzhki investicionnoj deyatel'nosti v celyah obespecheniya sbalansirovannogo i ustojchivogo rosta: vozmozhnosti dlya Rossii (Comparative analysis of the financing mechanisms of "green" and "dirty" investment projects. Research note 23 "Green" financing as a mechanism for financial support of investment activities in order to ensure balanced and

- sustainable growth: opportunities for Russia), available at: <https://investinfra.ru/frontend/images/PDF/minfin-green-docs/minfin-green-docs-17.pdf>
28. Standart social'noj otchetnosti GRI (Global Reporting Initiative), available at: <https://www.globalreporting.org/Pages/default.aspx>
 29. Strategiya razvitiya promyshlennosti po obrabotke, utilizacii i obezvrezhivaniyu othodov proizvodstva i potrebleniya na period do 2030 goda (The development strategy of the industry for the treatment, recycling and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030), available at: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>
 30. Strategiya ehkologicheskoy bezopasnosti, Ukaz prezidenta RF O Strategii ehkologicheskoy bezopasnosti RF na period do 2025 goda (Environmental Security Strategy, Presidential Decree on the Environmental Security Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_215668/, 19.04.2017.
 31. Strategiya jekonomicheskoy bezopasnosti RF na period do 2030 goda, podpisannuyu Prezidentom Rossii v 2017 godu, Ukaz Prezidenta RF (Economic Security Strategy of the Russian Federation for the period until 2030, signed by the President of Russia in 2017, Decree of the President of the Russian Federation), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216629/, 13.05.2017.
 32. Khutorova, N.A. Zelenaya ehkonomika kak instrument stimulirovaniya ehkonomicheskogo rosta (Green economy as a tool to stimulate economic growth), available at: http://id.atiso.ru/files/tiso_10_2014.pdf
 33. Centr po problemam ehkologii i produktivnosti lesov rossijskoj akademii nauk (cehpl ran) Aktual'nye problemy nacional'noj lesnoj politiki 2016 (Center for Ecology and Forest Productivity of the Russian Academy of Sciences (Tsepl Ran) Actual Problems of National Forest Policy 2016), available at: <http://ekollog.ru/centr-po-problemam-ehkologii-i-produktivnosti-lesov-rossijskoj.html?page=6>
 34. Jekologicheskij rejting sub"ektov RF, Itogi leta 2017 goda (Ecological rating of the subjects of the Russian Federation, the results of the summer of 2017), available at: <http://www.greenpatrol.ru/en/node/292731>
 35. Jekologiya i jekonomika: rost zagryazneniya atmosfery strany, Byulleten' o tekushchih tendenciayah rossijskoj jekonomiki (Ecology and economics: the growth of the country's atmosphere pollution, Bulletin on current trends in Russian economy), available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/17409.pdf>, 07.2018.

УДК 630.8 + 502.2

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ «ЛЕСНОЙ ПРОДУКЦИИ»

В.С. Шалаев

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Мытищинский филиал)

В статье дана краткая характеристика Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО) и более подробная – 5-го отделения «Лесная продукция» (Forest Products). Приведены основные понятия принятой на XXIV Всемирном конгрессе ИЮФРО в Солт-Лейк-Сити в 2014 году и действующей Стратегии Международного союза лесных исследовательских организаций. При этом Стратегия ИЮФРО «Соединяя леса, науку и людей» на 2015-2019 гг. определяет пять укрупненных направлений и три институциональных цели развития. Три институциональных цели, адаптированные к предыдущей Стратегии, обеспечивают развитие исследований и междисциплинарное сотрудничество. Пять тематических направлений: 1. Леса для людей; 2. Леса и изменения климата; 3. Леса и лесная продукция для «зеленого» будущего; 4. Биоразнообразие, экосистемные услуги и биоинвазия; 5. Взаимодействие лесов, почвы и воды. Третье направление подчеркивает значимость исследований лесной продукции и в наиболее общем виде определяет динамику их развития, в первую очередь учитывая глобальность стоящих перед человечеством задач устойчивого развития, в том числе задач устойчивости климата. Отмечена актуальность и значимость исследований регулярно издаваемого сборника «Лесные экосистемы в условиях изменения климата», отвечающих трендам исследований мировой лесной науки. Приведены показатели, характеризующие уровень финансирования «лесной» науки в нашей стране. Обоснована необходимость увеличения объемов «лесных» исследований, представляется целесообразной определенная координация выполняемых исследований, прогнозирование их направленности.

Ключевые слова: исследования, ИЮФРО, лесная продукция, климат, научно-исследовательские работы.

RESEARCH INTO «FOREST PRODUCTS»

V.S. Shalaev

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchy Branch)

The article describes the work of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) with the focus on Division 5. Forest Products. The main concepts adopted at the XXIV-th World IUFRO Congress in Salt Lake City in 2014 and the key issues of IUFRO Strategy have been presented. The IUFRO Strategy for 2015-2019 «Interconnecting Forests, Science and People» has identified five research themes and emphasis areas, as well as three institutional goals. The goals adapted from the previous Strategy have presented the IUFRO's commitment to research excellence and interdisciplinary cooperation, to better visibility of IUFRO's knowledge products and network cooperation and to science-based solutions and options for influencing policy processes. The following five themes are aimed at maintaining scientific collaboration within IUFRO's global network: 1. Forests for People; 2. Forests and Climate Change; 3. Forests and Forest-based Products for a Greener Future; 4. Biodiversity, Ecosystem Services and Biological Invasions; 5. Forest, Soil and Water Interactions. The third theme emphasizes the importance of forest products research and in the most general form determines the dynamics of their development, primarily taking into account the global nature of the challenges of sustainable development facing humanity, including the challenges of climate stability. The relevance and significance of studies published in "Forest ecosystems under climate change" periodical has been noted. The indicators characterizing the level of forest science financing in our country have been provided. The necessity of increasing the scope of forest research has been justified. It is deemed necessary to coordinate the research carried out and to predict further research focuses.

Keywords: research, IUFRO, forest products, climate.

Введение

Широко известен Международный союз лесных исследовательских организаций (ИЮФРО), объединяющий ученых мирового научного лесного сообщества. В состав этой организации с более чем 125-летним опытом работы входит в настоящее время более 15 тысяч ученых из более чем 600 организаций 126 стран мира. Деятельность Союза отражает весь спектр «лесных» исследований мира. Структура ИЮФРО в настоящее время включает 9 отделений: 1. Лесоводство; 2. Физиология и генетика; 3. Проектирование и управление лесными технологиями и операциями; 4. Лесная инвентаризация, моделирование и управление; **5. Лесная продукция**; 6. Социальные аспекты лесов и лесного хозяйства; 7. Состояние лесов; 8. Лесная экология; 9. Лесная экономика и политика (ИЮФРО, 2018; Шалаев, 2007, 2014, Johann et al., 2017).

И если взаимосвязь исследований проблем устойчивости климата, функционирования лесных экосистем в условиях изменения климата для большей части отделений не вызывает сомнений, направленность отделения 5. Лесная продукция (Forest Products) выглядит не столь однозначно на первый взгляд.

Анализ направленности исследований

В настоящее время в рамках 5-го отделения ИЮФРО сформировались и действуют рабочие и специальные исследовательские группы, спектр которых отражает совокупность научных исследований ученых мирового сообщества, работающих по рассматриваемому направлению (Тепляков, Шалаев, 2015а; Шалаев, 2015; 2016; Курбанов, Воробьев, 2014). Итак, это:

- качество древесины и волокна (моделирование качества древесины; анализ годовых колец; исследование изменчивости древесины; неразрушающая оценка древесины и материалов на основе древесины; фундаментальные свойства древесины и материалов на основе древесины);

- защита древесины (биологическое сопротивление древесины; защита древесины в карантинных целях, пищевой упаковки и торговли; защита древесины в условиях тропиков; защита культурных артефактов; защита используемых природных продуктов);
- обработка древесины (сушка древесины; клеи и склеивание; пиление и машинная обработка; промышленный инжиниринг, операционный анализ и логистика);
- композитная и восстановленная продукция;
- свойства и использование плантационной древесины (использование древесины плантационного тика; использование древесины плантационного эвкалипта);
- биопереработка (целлюлоза и бумага; небольшие традиционные энергосистемы);
- маркетинг и бизнес-управление при производстве лесной продукции;
- недревесные лесные продукты (медицинские лесные продукты; съедобные лесные продукты; бамбук и раттан; промышленные экстракты);
- устойчивое использование лесной продукции (анализ жизненного цикла лесной продукции; сертифицированные лесные товары и услуги);
- культура лесной продукции.

Очевидно, понятие «лесная продукция» в этом случае имеет достаточно широкий смысл, и в этом есть свой резон. При все большей отстраненности государства от финансирования «лесной» науки (и не только в нашей стране) следует, очевидно, добиваться должного понимания значимости этого восстанавливаемого ресурса. Ведь не только утилитарную продукцию, но и чистую воду, воздух, лесную фауну и флору в определенной степени возможно отнести к этой области, области «лесной продукции».

Вместе с тем в настоящее время в рамках ИЮФРО действует принятая на XXIV Всемирном конгрессе в Солт-Лейк-Сити в 2014 году Стратегия Международного союза лесных исследовательских организаций. При этом рассмотренная и утвержденная Стратегия ИЮФРО «Соединяя леса, науку и людей» на 2015-2019 гг. определяет пять укрупненных направлений и три институциональные цели развития (Тепляков, Шалаев, 2015б; IUFRO 2015-2019 STRATEGY). Три институциональные цели, адаптированные к предыдущей Стратегии, обеспечивают развитие исследований и междисциплинарное сотрудничество. При этом следует подчеркнуть пять тематических направлений:

1. Леса для людей.
2. Леса и изменения климата.
- 3. Леса и лесная продукция для «зеленого» будущего.**
4. Биоразнообразие, экосистемные услуги и биоинвазия.
5. Взаимодействие лесов, почвы и воды.

И в данном случае следует остановиться особо на 3-м направлении, наиболее отражающим рассматриваемое. Этот раздел Стратегии состоит из трех частей.

Состояние проблемы. Одна треть земной суши покрыта лесами. Наши леса и возобновляемая продукция, которую они производят, будут играть решающую роль в будущем благополучии населения мира. Более четверти населения Земли зависит от лесов как средства к существованию. Большая часть мировой древесной биомассы потребляется населением как основное сырье для приготовления пищи и отопления. Тем не менее, леса должны также обеспечивать пресной водой, чистым воздухом, биоразнообразием, хранением углерода и оказывать многие другие экосистемные услуги. Следовательно, спрос на лесную продукцию и обеспечиваемые лесами экосистемные услуги будет расти в соответствии с увеличением населения.

Обоснование. Важнейшая роль лесов в благополучии населения Земли достаточно определена. Вместе с тем перспективы удовлетворения будущих потребностей еще не совсем ясны и изучены. Мы знаем, что леса могут играть все более важную роль в устойчивости мировой экономики, на региональном и местном уровнях, в благосостоянии людей, при формирующейся на биологической основе экономике. Однако обеспечение возрастающих требований для удовлетворения индивидуальных потребностей без ущерба возможностям лесов является серьезной междисциплинарной задачей, стоящей перед лесным научно-исследовательским сообществом.

Акценты направленности. 1. Открытие новых лесных продуктов и услуг - биоэнергии, биоматериалов, недревесных продуктов, совершенствования окружающей среды и благосостояния человека. Разработка новых продуктов из лесного сырья в последние годы ориентирована в значительной степени на биотопливо и биоэнергетику. Вместе с тем другие виды продукции также не менее значимы, например, новые способы использования древесины в строительстве, древесно-стружечные биоматериалы, включая биохимические вещества, биопластик и пищевые добавки. Кроме того, все большее признание получают разнообразные услуги леса, обеспечивающие окружающую среду и благополучие человека. Эти новые лесные продукты и услуги должны быть исследованы и оценены по их вкладу в будущее.

2. Оптимальное использование лесного сырья. Важно максимально использовать экономические, социальные и экологические преимущества использования лесной продукции при обеспечении устойчивости развития и ее вклада в «зеленое» будущее. Обеспечивает ли лесная продукция действительно более устойчивое развитие, чем другая конкурирующая продукция (например, бетон, сталь, конопля, хлопок), особенно при целостном подходе и оценке воздействия на окружающую среду?

3. Вклад лесов и их экосистемных услуг в традиционный ВВП и «зеленую/на биооснове» экономику. Леса и предоставляемые ими услуги являются неоднократно и последовательно недооценены. В результате, среди прочего, мы имеем процессы обезлесения и деградации лесов. Учитывая, что в ближайшее время не прогнозируется изменения экономической системы в мире, сможем ли мы в соответствии с текущей ситуацией разработать системы оценки, которые подтвердят истинную ценность лесов, особенно в сопоставлении с конкурирующей продукцией?

Этими положениями одобренная международным лесным сообществом Стратегия на 2015-2019 гг. подчеркивает значимость рассматриваемых направлений исследований лесной продукции и в наиболее общем виде определяет динамику их развития. При этом направленность данного раздела Стратегии отражает не столько прикладную особенность исследований «лесной продукции», сколько глобальность стоящих перед человечеством задач устойчивого развития, в том числе задач устойчивости климата.

В этом случае актуальность и значимость проблематики, поднимаемой Центром устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов Поволжского государственного технологического университета в регулярно издаваемом сборнике «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг» отвечает трендам исследований мировой лесной науки (Tikina, Kurbanov, 2012; Губаев и др., 2012; Loboda et al., 2012; Курбанов, 2016).

Объемы научно-исследовательской работы в интересах лесного комплекса в нашей стране, в том числе исследований лесной продукции, находятся на весьма низком уровне: «Расходы на НИОКР составляют около 0,01% от ВВП отрасли, что существенно ниже среднего зарубежного уровня (1,4% ВВП) и уровня стран-лидеров (Финляндия 2%; Норвегия 3,1%)»¹. Даже если это и недосмотр упомянутого документа (на стр. 13 проекта Стратегии этот показатель «...не превышает 0,1% от ВВП, создаваемого в лесном комплексе.»), уровень расходов на НИОКР является недопустимо низким. Для сравнения: в России в целом по стране внутренние затраты на исследования и разработки составляли 1,1% к ВВП в 2016 году (Индикаторы науки, 2018). Если же учитывать содержательную сторону проводимых научно-исследовательских работ в интересах лесного комплекса, количество и направленность отраслевых НИИ, можно наверняка предположить, что в интересах «лесной продукции» этот показатель еще ниже. Выполняемые работы в большинстве своем соответствуют мировым тенденциям развития, однако практически полностью отсутствует должная координация и необходимая направленность исследований, вопросы прогнозирования в этом случае не востребованы и не рассматриваются должным образом.

¹Проект Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, с. 95 (март 2018 г.)

При этом отраслевая специфика исследований, совершенно недостаточная заинтересованность бизнеса в этом, отстраненность государства лишь подчеркивают, подтверждают неблагоприятность ситуации.

Заключение

Совокупность направлений исследования «лесной продукции», базирующаяся на достаточно значимом и репрезентативном числе работ ученых лесного сообщества в рамках ИЮФРО, может служить объективной основой для оценки ее существующего состояния, в том числе и в нашей стране.

Положения Стратегии ИЮФРО на 2015-2019 гг. подчеркивают значимость рассматриваемых направлений исследований лесной продукции и в наиболее общем виде определяет динамику их развития. При этом направленность соответствующего раздела Стратегии отражает не столько прикладную особенность исследований «лесной продукции», сколько глобальность стоящих перед человечеством задач устойчивого развития, в том числе задач устойчивости климата.

Направленность исследований мирового сообщества, прогнозные оценки в этом случае имеют содержательное и важное значение, должны анализироваться и учитываться при планировании и выполнении отечественных лесных исследований, особенно в развивающемся процессе интеграции российской науки в мировое научное пространство.

В условиях нашей страны необходимо существенное увеличение объемов «лесных» исследований, целесообразна определенная координация выполняемых исследований, прогнозирование их направленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/8.9.

Библиографический список

1. Губаев, А.В. Мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений методами дистанционного зондирования [Электронный ресурс] / А.В. Губаев, Э.А. Курбанов, О.Н. Кранкина, О.Н. Воробьев // Влияние аномальной погоды на природные, социально-экономические и искусственные системы: засуха 2010 года в Поволжье России: материалы международной научной конференции NASA и семинара GOFC-GOLD/NEESPI. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 92-98. – Режим доступа: <http://csfm.marstu.net/publications.html>. – 13.09.2018
2. Индикаторы науки: 2018: статистический сборник / Н.В. Городникова, Л.М. Гохберг, К.А. Дитковский и др. – М.: НИУ ВШЭ, 2018. – 320 с.
3. ИЮФРО [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iufro.org/publications/general-publications>"w.iufro.org/w.iufro.org/publications/general-publications". – 2018.
4. Курбанов, Э.А. Итоги международной конференции «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг» / Э.А. Курбанов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2016. – № 1 (29). – С. 87-89.
5. Курбанов, Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие. Рекомендовано УМО по образованию в области лесного дела / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
6. Тепляков, В.К. История съездов ИЮФРО и Россия: монография: в 2-х т. Т.1 / В.К. Тепляков, В.С. Шалаев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: МГУЛ, 2015а. – 469 с.
7. Тепляков, В.К. История съездов ИЮФРО и Россия: монография: в 2-х т. Т.2 / В.К. Тепляков, В.С. Шалаев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: МГУЛ, 2015б. – 372 с.
8. Шалаев, В.С. Направления лесных исследований: состояние и перспективы // Вестник МГУЛ - Лесной вестник, 2007. – Вып. 4 (53). – С. 4-5.
9. Шалаев, В.С. Направления лесных исследований в мире: Навстречу XXIV Всемирному конгрессу ИЮФРО // Технология и оборудование для переработки древесины // Науч. тр. – Вып. 370. – М.: МГУЛ, 2014. С.4-9.
10. Шалаев, В.С. Направления исследований лесной продукции в мире: от Любляны до Солт-Лейк-Сити // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2015. – Вып. 1(19). – С. 229-232.
11. Шалаев, В.С. Научно-исследовательская работа. Конспект лекций. Часть 1: учеб. Пособие. – М.: МГУЛ, 2016. – 72 с.
12. Johann, E. 125 Years of IUFRO. History of the International Union of Forest Research Organizations 1892-2017 / E. Johann, A. Buck, B. Burger, M. Kleine, R. Pruller, G. Wolfrum. – Vienna, 2017 – 128 p.

13. IUFRO 2015-2019 STRATEGY. Interconnecting forests, science and people. – 18 p. Available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/
14. Loboda, T. Understanding Origins and Impacts of Drought / T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2012. – Vol. 93(42). – P. 417.
15. Tikina, A.V. Extreme weather events and long-term forestry obligations: is reliance on forest certification possible? [Electronic resource] / A.V. Tikina, E.A. Kurbanov // *Impacts of extreme weather on natural, socio-economic and land-use systems: focus on the 2010 summer anomaly in the Volga region: Proceedings of the NASA Science Meeting, GOF-C-GOLD and NEESPI Workshop and Regional Conference*. – Yoshkar-Ola: VolgaTech, 2012. – R. 145-148. – <http://csfm.marstu.net/publications.html>. – 11.08.2017

References

1. Gubaev, A.V. Monitoring i prognozirovaniye sostoyaniya lesnykh nasazhdeniy metodami distantsionnogo zondirovaniya (Monitoring and forecasting the state of forest plantations by remote sensing methods), A.V. Gubaev, E.A. Kurbanov, O.N. Krankina, O.N. Vorobiev, *Proc. Conf. Vliyaniye anomal'noy pogody na prirodnyye, sotsial'no-ekonomicheskiye i iskusstvennyye sistemy: zasuha 2010 goda v Povolzh'e Rossii*, Yoshkar-Ola, 2012, Pp. 92-98, available at: <http://csfm.marstu.net/publications.html>, 13.09.2017.
2. Gorodnikova, N.V. Indikatory nauki: 2018: statisticheskiy sbornik (Indicators of Science: 2018: Statistical Digest), N.V. Gorodnikova, L.M. Gokhberg, K.A. Ditkovskiy i dr., Moscow, 2018, 320 p.
3. IYUFRO (IUFRO), available at: <https://www.iufro.org/>, 2018.
4. Kurbanov, E.A. Itogi mezhdunarodnoy konferencii "Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring" (Results of the international conference "Forest ecosystems in a changing climate: biological productivity and remote monitoring"), E.A. Kurbanov, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, Vol. 1, No. 29, Pp. 87-89.
5. Kurbanov, E.A. Lesovodstvo. Mezhdunarodnoye lesnoye hozyajstvo (Forestry. International Forestry), E.A. Kurbanov, O.N. Vorobiev, Yoshkar-Ola, 2014, 254 p.
6. Teplyakov, V.K. Istoriya s"ezdov IYUFRO i Rossiya (The History of IUFRO Congresses and Russia), V.K. Teplyakov, V.S. Shalaev, Moscow, 2015, Vol. 1, 469 p.
7. Teplyakov, V.K. Istoriya s"ezdov IYUFRO i Rossiya (The History of IUFRO Congresses and Russia), V.K. Teplyakov, V.S. Shalaev, Moscow, 2015, Vol. 2, 372 p.
8. Shalaev, V.S. Napravleniya lesnykh issledovaniy: sostoyaniye i perspektivy (The Directions of Forest Research: State and Prospects), *Lesnoy vestnik*, 2007, Vol. 4, No. 53, Pp. 4-5.
9. Shalaev, V.S. Napravleniya lesnykh issledovaniy v mire: Navstrechu XXIV Vsemirnomu kongressu IYUFRO (The Directions of Forest Research in the World: Towards to the XXIV IUFRO World Congress), *Proc. Conf. Tekhnologiya i oborudovaniye dlya pererabotki drevesiny*, Moscow, 2014, Vol. 370, Pp. 4-9.
10. Shalaev, V.S. Napravleniya issledovaniy lesnoy produktsii v mire: ot Lyublyany do Solt-Leyk-Siti (The Directions of Forest Products Research in the World: from Ljubljana to Salt Lake City), *Lesnoy vestnik*, 2015, Pp. Vol. 1, No. 19, 229-232.
11. Shalaev, V.S. Nauchno-issledovatel'skaya rabota. Konspekt lektsiy. Chast' 1 (Research Work. Lecture notes. Part 1), Moscow, 2016, 72 p.
12. Johann, E. 125 Years of IUFRO. History of the International Union of Forest Research Organizations 1892-2017, E. Johann, A. Buck, B. Burger, M. Kleine, R. Pruller, G. Wolfrum, Vienna, 2017, 128 p.
13. IUFRO 2015-2019 STRATEGY. Interconnecting forests, science and people, available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/
14. Loboda, T. Understanding Origins and Impacts of Drought, T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov, *Transactions American Geophysical Union*, 2012, Vol. 93, No. 42, 417 p.
15. Tikina, A.V. Extreme weather events and long-term forestry obligations: is reliance on forest certification possible, A.V. Tikina, E.A. Kurbanov, *Proc. Conf. Impacts of extreme weather on natural, socio-economic and land-use systems: focus on the 2010 summer anomaly in the Volga region*, Yoshkar-Ola, 2012, Pp. 145-148, available at: <http://csfm.marstu.net/publications.html>, 11.08.2017.

УДК 631.436 (470.343)

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ПОЛВЕКА

Ю. П. Демаков^{1,2}, А. В. Исаев^{2,3}, Г. А. Богданов²

¹Поволжский государственный технологический университет

²Государственный природный заповедник «Большая Кокшага»

³Марийский государственный университет

Приведены результаты статистической обработки материалов наблюдений за температурой разных слоев почвы (от 20 до 320 см) за 1963-2013 годы на ГМС Йошкар-Ола, определены пределы и закономерности ее сезонных изменений. Установлено, что ее средняя годовая температура, которая практически не изменяется с глубиной, выше средней годовой

температуры воздуха на 4,2-4,5°C, составляя 6,8-7,1°C. На глубине всего 20 см температура почвы в течение девяти месяцев (январь-март и июль-декабрь) выше средней месячной температуры воздуха, а на глубине 320 см с апреля по сентябрь она, наоборот, ниже. Связь между многолетними рядами значений средней месячной температуры воздуха и почвы в зимний период довольно слабая, что связано с вариацией толщины снежного покрова в разные годы, а с апреля по октябрь – очень тесная. Очень тесна также связь между средней годовой температурой почвы на глубине 20 см и приземного слоя атмосферы, оцененная по материалам различных метеостанций России. Годовой ход температуры почвы на каждой отметке глубины имеет свои особенности, отражаемые соответствующими уравнениями регрессии. Сезонный минимум на глубине 20 см отмечается чаще всего в конце третьей декады декабря или в середине первой декады января, сдвигаясь на 5-7 дней на каждые 10 см глубины (на глубине 320 см он отмечается уже в конце апреля). Максимум на глубине 20 см наступает в основном в середине июля, а на глубине 320 см – в конце августа или даже сентября. Значения средней температуры почвы в летне-осенний период и годового максимума имеют четкую тенденцию к увеличению, связанную с глобальным потеплением климата, что подтверждает данные исследователей по другим регионам России.

Ключевые слова: почва; температура; сезонная и многолетняя динамика, Россия.

DYNAMICS OF SOIL TEMPERATURE IN MARI EL REPUBLIC OVER THE PAST FIFTY YEARS

Yu.P. Demakov^{1,2}, A.V. Isaev^{2,3}, G.A. Bogdanov²

¹Volga State University of Technology

²Bolshaya Kokshaga State Nature Reserve

³Mari State University

The paper presents statistical results of longitudinal observation of soil temperatures measured at different soil layers (from 20cm to 320 cm) over the period from 1963 to 2013 at the meteorological station of Yoshkar-Ola. The temperature range and its seasonal changes have been identified. It has also been revealed that the average annual temperature, which remains relatively constant at the depths under study, is by 4.2-4.5°C higher than the average annual air temperature, thus reaching 6.8-7.1°C. During nine months (January-March, July-December) at the depth of 20 cm the soil temperature is higher than the average monthly air temperature, while at the depth of 320 cm it is lower in the period from April to September. During winter months the correlation between the perennial values of the average monthly air and soil temperatures is rather weak, due to the variation in the thickness of snow cover in different years. From April to October the correlation is rather strong. There is also a strong correlation between the average annual soil temperature at the depth of 20 cm and the surface air estimated by the data provided by different meteorological stations. The annual temperature cycle at every depth mark has its own specific features reflected in a corresponding equation of regression. The seasonal minimum at the depth of 20 cm is most often observed in the last ten day period of December or in the middle of the first ten day period of January. The seasonal minimum shifts by 5-7 days with every 10 cm of depth (at the depth of 320 cm the seasonal minimum is recorded at the end of April). The seasonal maximum at the depth of 20 cm is attained in the middle of July, while at the depth of 320 cm - at the end of August or even September. The values of average soil temperature in summer-autumn period and the annual maximum demonstrate a clear upward trend caused by the global warming. This is also proved by the research data obtained in other Russian regions.

Key words: soil; temperature; seasonal and perennial dynamics; Russia.

Введение. Климат почвы является одним из важнейших природных ресурсов конкретной территории, во многом определяя не только продуктивность, направление и темпы развития биогеоценозов, но также состояние экономики и условия проживания людей. Особенно резко это проявляется в экстремальные периоды (Lafter et al, 2010; Gewehr et al., 2014; Loboda et al., 2017). Постановка вопроса о климате почвы, основными элементами которого

являются температура и влажность, принадлежит отечественным ученым П.А. Костычеву, В.В. Докучаеву, А.А. Измаильскому, С.С. Неуструеву, А.И. Воейкову, К.П. Горшенину, С.П. Кравкову, М.М. Филатову, П.И. Колоскову (Шульгин, 1967), которые отмечали, что он, хотя и зависит от климата атмосферы, но не тождественен ему, имея многие специфические черты, которые должны являться предметом пристального внимания исследователей.

К настоящему времени накоплен огромный материал и выявлены основные закономерности его изменения в пространстве и времени (Zhang et al, 2000; Mellander et al., 2007; Архангельская, 2012; Битюков, 2012; Десяткин и др., 2012; Демаков, Исаев, 2013; Татаринцев, 2015). Так, к примеру, установлено, что суточные и сезонные колебания температуры почвы зависят от их гранулометрического состава и влажности, а также физико-географических условий местности, климата и характера покрывающей растительности. Сухие и хорошо дренируемые почвы весной и летом являются теплыми, а тяжелые переувлажненные – холодными. В весенний период глинистые почвы холоднее, а песчаные теплее, осенью же глинистые почвы, наоборот, теплее песчаных. Период колебаний температуры почвы в течение суток и года, как показал великий французский математик Жан Батист Фурье (1768-1830) в работе «Аналитическая теория тепла» (1822), не изменяется с ростом ее глубины, а их амплитуда уменьшается в геометрической прогрессии, постепенно затухая (Шульгин, 1967). Глубина постоянной суточной и годовой температуры соотносятся между собой как корни квадратные из периодов колебаний (глубина затухания годовых колебаний, согласно этому положению, в 19 раз превышает глубину затухания суточных колебаний). Время наступления максимумов и минимумов температуры запаздывает пропорционально глубине почвы. Годовой ход температуры почвы в умеренных широтах характеризуется обычно одним максимумом в июле или августе и одним минимумом в январе или феврале. Амплитуда годового хода температуры поверхности оголенной почвы не зависит от географической широты и составляет около 30°C. В северных широтах глубина проникновения годового хода температуры почвы составляет примерно 25 м, в средних – 15-20 м, а в южных – около 10 м. Ниже этой глубины лежит слой постоянной годовой температуры, где не только суточные, но и годовые колебания температуры не наблюдаются. Изменение температуры почвы с глубиной в отдельные периоды года различно. Так, осенью на некоторой глубине почвы наблюдается наиболее теплый слой, от которого температура убывает как в глубь почвы, так и к ее поверхности. Весной же, наоборот, между более теплыми слоями сверху и снизу находится наиболее холодный слой.

Систематические наблюдения за температурным режимом почвы проводятся в нашей стране сетью станций Гидрометеослужбы уже давно, однако огромные массивы накопленных данных по многолетней его динамике остаются пока практически не обработанными и слабо вовлеченными в научный оборот, хотя они могут дать полезную информацию об особенностях динамики состояния биогеоценозов (Балыбина, Трофимова, 2013), являясь важным дополнением к временным рядам метеорологических данных.

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей сезонной и многолетней динамики температуры почвы на территории Республики Марий Эл.

Материал и методы. Для работы использован массив суточных данных о температуре почвы на глубине до 320 см по ГМС Йошкар-Ола за период с 1963 по 2013 годы, находящийся в свободном доступе в сети Интернет (<http://meteo.ru>), а также материалы собственных наблюдений на девяти постоянных пробных площадях, заложенные в различных экотопках заповедника «Большая Кокшага», Ботанического сада-института ПГТУ и лесопарков г. Йошкар-Олы. Замеры температуры выполняли в 3-5-кратной повторности на глубине 5, 10, 20, 40, 60 и 80 см электронным термометром «Мини-замер», имеющим погрешность $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Цифровой материал обработан на компьютере с использованием стандартных методов математической статистики и прикладных программ Excel и Statistica.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ полученных данных показал, что средняя годовая температура почвы составляет 6,8-7,1°C, что выше средней годовой температуры воздуха на 4,2-4,5°C, и практически не изменяется с глубиной (табл. 1). Годовой же минимум температуры почвы на глубине 20 см выше, чем воздуха, на 42°C, а максимум и амплитуда (размах), наоборот, ниже на 12,6 и 53,6°C соответственно. Почва, таким образом, характеризуется более сглаженным температурным режимом по сравнению с приземным слоем атмосферы, хотя колебания между годовым максимумом и минимумом прослеживаются вплоть до глубины 320 см. Минимальная и максимальная температуры, а также размах между их значениями (Y , °C) изменяются по градиенту глубины (h , см) строго закономерно и аппроксимируется следующими уравнениями регрессии:

$$t_{\min} = 10,3'[1 - \exp(-14,73 \cdot 10^{-3} \cdot h)] - 8,64; R^2 = 0,984;$$

$$t_{\max} = 17,9' \exp(-9,18 \cdot 10^{-3} \cdot h) + 11,3; R^2 = 0,995;$$

$$Y = 27,8' \exp(-11,14 \cdot 10^{-3} \cdot h) + 10,0; R^2 = 0,997.$$

Таблица 1

Средняя, минимальная и максимальная годовая температура почвы по данным ГМС Йошкар-Ола

Температура	Значение температуры на разной глубине, °C							
	20 см	40 см	60 см	80 см	120 см	160 см	240 см	320 см
Средняя годовая	6,9	7,1	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,8
Минимальная	-6,0	-3,9	-2,8	-1,6	-0,2	0,9	2,0	1,0
Максимальная	26,4	23,2	21,7	20,1	17,5	14,9	13,6	12,1
Амплитуда	32,4	27,1	24,4	21,7	17,7	14,0	11,6	11,1

Годовой ход температуры почвы на каждой отметке глубины имеет свои особенности (табл. 2, рис. 1), отражаемые соответствующими уравнениями регрессии (табл. 3). Сезонный минимум на глубине 20 см отмечается чаще всего в конце третьей декады декабря или в середине первой декады января, сдвигаясь на 5-7 дней на каждые 10 см глубины (на глубине 320 см он отмечается уже в конце апреля). Температурный максимум на глубине 20 см наступает в основном в середине июля, а на глубине 320 см – в конце августа или даже сентября.

Таблица 2

Средняя многолетняя температура почвы в последний день месяца по данным ГМС Йошкар-Ола

Месяц	Температура почвы на разной глубине, °C							
	20 см	40 см	60 см	80 см	120 см	160 см	240 см	320 см
I	-1,3	-0,6	0,1	0,7	1,8	2,9	4,2	5,3
II	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,4	2,3	3,6	4,5
III	-0,2	0,0	0,3	0,5	1,2	2,0	3,1	3,9
IV	7,2	6,1	4,9	3,9	3,0	2,7	3,1	3,5
V	14,1	13,1	11,5	10,2	8,4	6,8	5,4	4,7
VI	19,1	17,9	16,1	14,4	12,1	10,2	8,0	6,8
VII	19,6	19,0	17,5	16,3	14,5	12,7	10,4	8,9
VIII	15,4	15,4	15,2	14,7	14,0	13,0	11,5	10,2
IX	9,1	10,0	10,5	10,9	11,3	11,4	11,1	10,4
X	2,9	4,2	5,1	6,0	7,4	8,4	9,2	9,4
XI	-0,6	0,7	1,8	2,8	4,3	5,6	7,0	7,9
XII	-1,5	-0,6	0,3	1,3	2,6	3,8	5,3	6,4

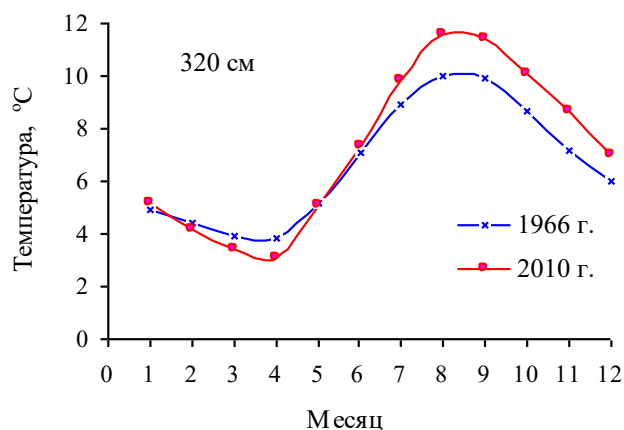
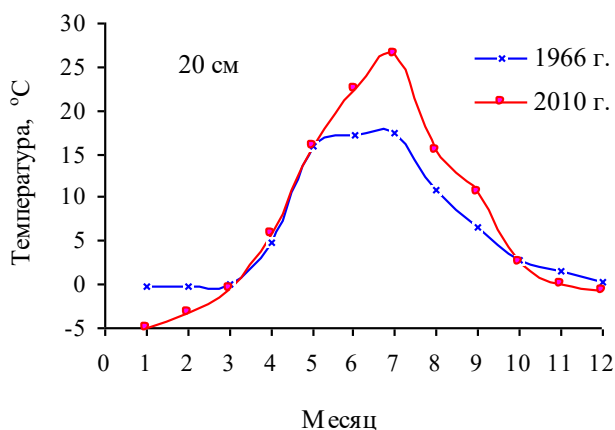


Рис. 1. Годовой ход температуры почвы на глубине 20 и 320 см в разные годы

Таблица 3

Параметры функции годичной динамики средней многолетней температуры почвы

Параметр	Значение параметров функции $Y=A'[\sin(2\pi t/11,5 + j) + 1]^b + c$ для разной глубины почвы							
	20 см	40 см	60 см	80 см	120 см	160 см	240 см	320 см
A	6,92	6,47	5,84	5,26	4,61	4,08	3,27	2,74
φ	-2,068	-2,145	-2,236	-2,338	-2,51	-2,701	-2,975	-3,235
b	1,653	1,631	1,611	1,596	1,524	1,435	1,36	1,288
c	-1,61	-0,81	-0,11	0,55	1,47	2,22	3,20	3,81
R^2	0,996	0,996	0,995	0,993	0,990	0,988	0,988	0,985

Расчеты показали, что почва обладает более высокой способностью к поглощению солнечной энергии, чем атмосфера, и ее температура на глубине всего 20 см в течение девяти месяцев года (январь-март и июль-декабрь) выше средней месячной температуры воздуха (рис. 2а). На глубине же 320 см с апреля по сентябрь она уже, наоборот, ниже. Связь между многолетними рядами значений средней месячной температуры воздуха и почвы в зимний период довольно слабая, что связано с вариацией толщины снежного покрова в разные годы, а с апреля по октябрь, наоборот, очень тесная (табл. 4). Очень тесна также связь между средней годовой температурой почвы на глубине 20 см и воздуха, оцененная по материалам наблюдений различных метеостанций России (рис. 2б).

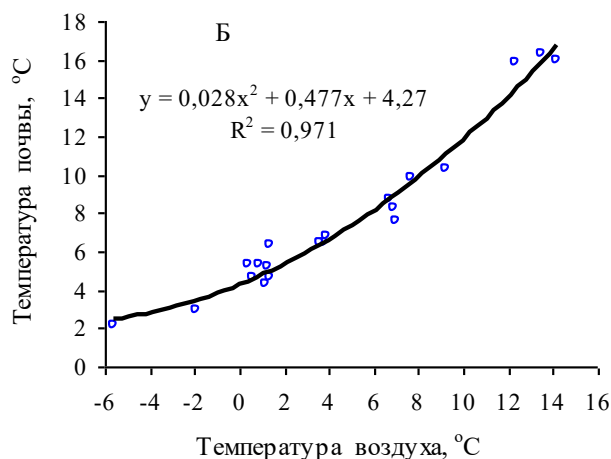
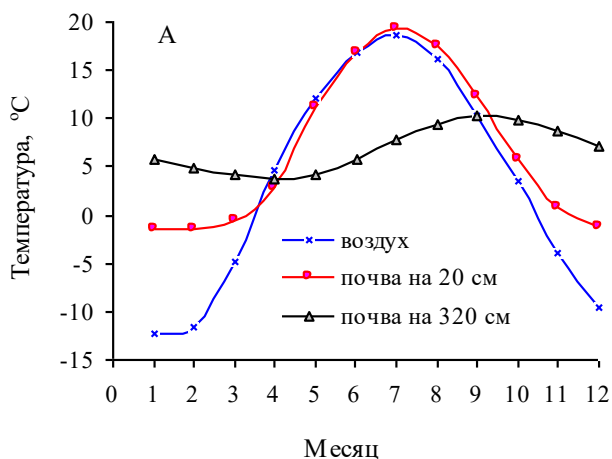


Рис. 2. Соотношение между средней месячной температурой воздуха и почвы на ГМС Йошкар-Ола (А) и средней годовой в различных регионах России (Б)

Таблица 4

Параметры линейной связи между рядами средней температуры воздуха и почвы на глубине 20 см по материалам многолетних измерений на ГМС Йошкар-Ола

Параметр функции	Значения параметров функции $Y = a \cdot X + b$ для разных месяцев года*											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
a	0,11	0,12	0,13	0,55	0,71	0,86	0,85	0,75	0,75	0,66	0,31	0,16
b	-0,04	0,10	0,00	0,21	2,68	2,41	3,58	5,42	4,42	3,40	2,06	0,28
R ²	0,19	0,21	0,34	0,73	0,76	0,77	0,74	0,60	0,80	0,83	0,58	0,22

*Примечание: Y – средняя годовая температура почвы, °C; X – средняя годовая температура воздуха, °C.

Значения средней температуры почвы в летне-осенний период и годового максимума имеют четкую тенденцию к увеличению (рис. 3 и 4), связанную с глобальным потеплением климата, что подтверждает данные исследователей по другим регионам России (Худяков, Решоткин, 2012; Балыбина, Трофимова, 2013). Годовой же минимум и глубина промерзания тренда практически не имеют, флуктуируя вокруг некоторого среднего уровня (рис. 5 и 6). Не остается также постоянной во времени продолжительность периодов с различной температурой почвы и суммы накопленного тепла (табл. 5), величина которых медленно, но неуклонно возрастает от года к году (рис. 7), что приводит летом к возрастанию разности между температурой почвы и воздуха (рис. 8).

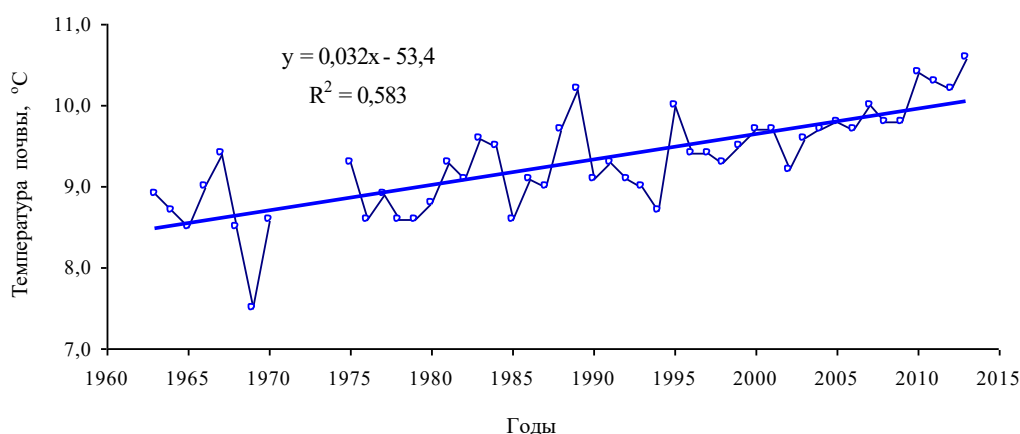


Рис. 3. Динамика средней температуры почвы на глубине 240-320 см в летне-осенний период

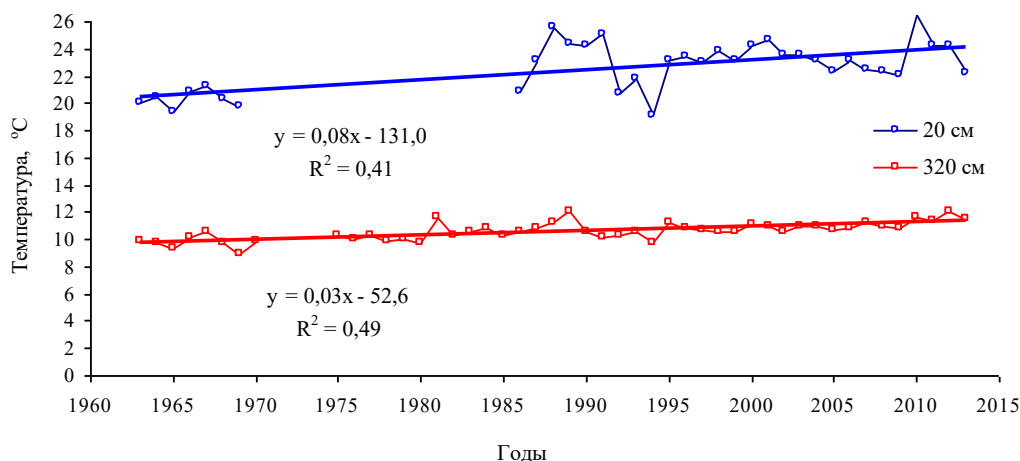


Рис. 4. Динамика максимальной температуры почвы на глубине 20 и 320 см по ГМС Йошкар-Ола

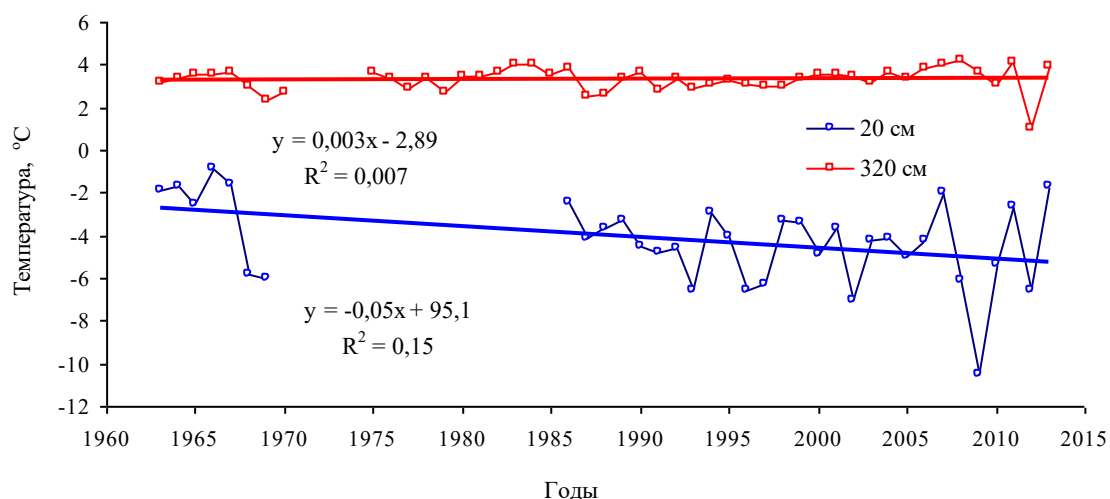


Рис. 5. Динамика минимальной температуры почвы на глубине 20 и 320 см по ГМС Йошкар-Ола

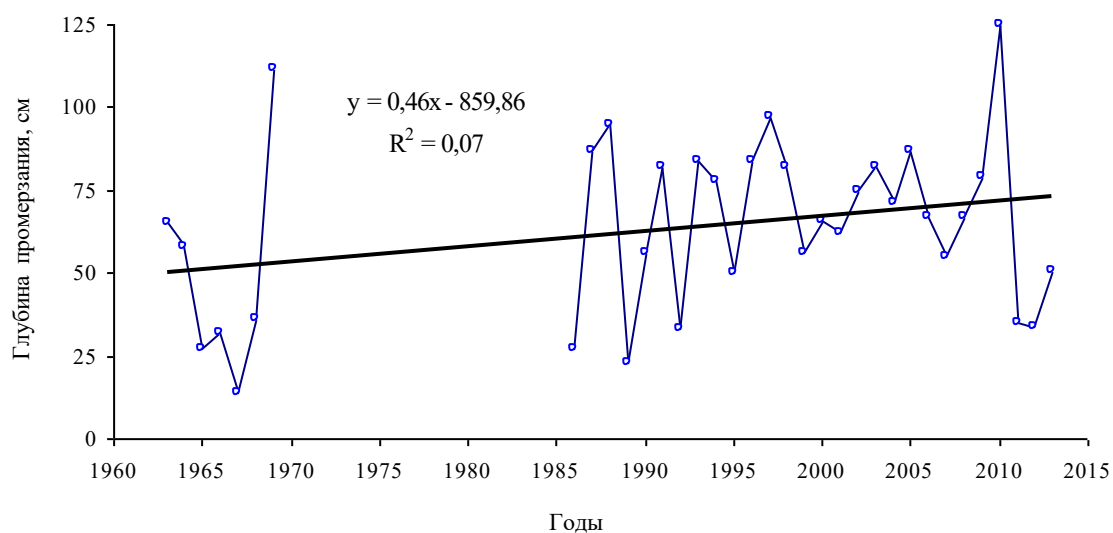


Рис. 6. Динамика глубины промерзания почвы по ГМС Йошкар-Ола

Таблица 4
Статистика параметров изменения температурного режима почв на ГМС Йошкар-Ола

Пороги температур	Значения статистических показателей на разной глубине измерения параметров							
	Глубина 20 см				Глубина 60 см			
	M_x	min	max	Размах	M_x	min	max	Размах
Продолжительность периода с различной температурой, дней								
>5°C	180	156	216	60	187	166	214	48
>10°C	139	118	173	55	135	117	156	39
>15°C	87	56	113	57	69	14	104	90
Сумма температур выше определенного значения, °C								
>5°C	2563	2110	2966	856	2377	1910	2763	853
>10°C	2254	1760	2828	1068	2004	1581	2401	820
>15°C	1607	916	2167	1251	1165	220	1771	1552

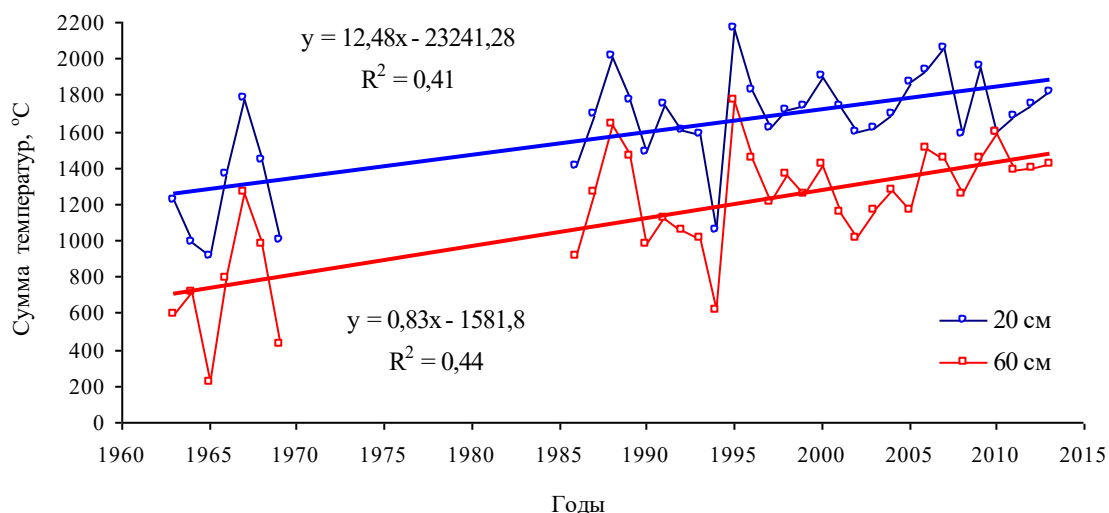


Рис. 7. Динамика суммы температур выше 15°C

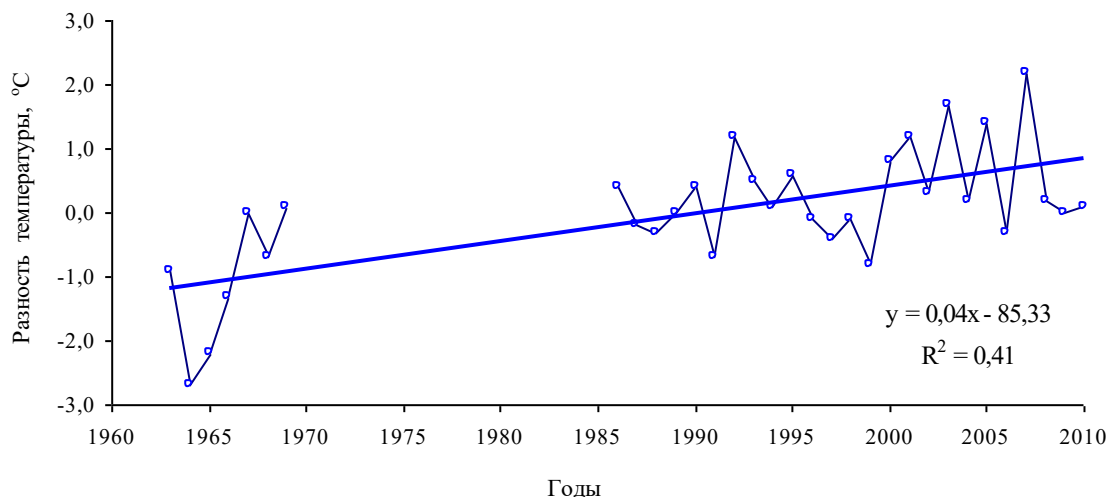


Рис. 8. Динамика разности между средней июньской температурой воздуха и почвы

Повышение температуры почвы приводит, как отмечают исследователи (Орлов, 1953; Шульгин, 1967; Галенко, 2013; Макарычев, Пастухов, 2013), к усилению деятельности почвенной биоты, которая, разлагая органическое вещество, выделяет в атмосферу углекислый газ и метан, увеличивая парниковый эффект. Это, в свою очередь, способствует улучшению условий роста растений, однако насколько сбалансированы эти процессы, пока неизвестно, так как регулярные наблюдения за температурным режимом почвы и состоянием биогеоценозов практически отсутствуют.

Термический режим почвы зависит, как показано многими исследователями (Шульгин, 1967; Кулькова, Шавалиева, 2011; Десяткин и др., 2012; Демаков, Исаев, 2013; Демаков и др., 2016, 2017; Макарычев, Лебедева, 2016), от их гранулометрического состава и влажности, а также характера растительного покрова и хозяйственного использования земель. Регулярные сопряженные наблюдения за температурой воздуха и почвы в различных экотопах проводятся, к сожалению, лишь эпизодически. Проведенные нами наблюдения показали, что температура разных слоев почвы изменяется на объектах исследования в течение вегетационного периода в довольно больших пределах, определяемых как погодными условиями того или иного года, так и особенностями экотопов (полноты и состава древостоев, типа почв, глубины залегания грунтовых вод и т.п.). Так, к примеру, в 2017 году наиболее высокой она была на лугу возле деревни Шаптунга, а самой низкой – в сосняке черничном со вторым ярусом

ели (табл. 5, рис. 9). Разница значений между экотопами составляла в мае в самом верхнем слое почвы 3,0°C, а на остальных глубинах изменялась от 2,2 до 2,4°C. В июле разница стала менее значительной и изменялась от 0,9 до 2,3°C. В сентябре температура почвы до глубины 20 см была самой высокой в сосняке лишайниковом, а наиболее же холодной она оставалась в сосняке черничниковом. Разница температуры между экотопами в этом месяце составляла в самом верхнем слое почвы 1,9°C, а на остальных глубинах изменялась от 0,5 до 1,0°C. Разница между верхним и нижним слоями в пределах каждого экотопа была также сугубо специфичной. В мае она составляла в среднем 2,6°C, изменяясь от 1,9 до 3,5°C (наиболее высокой она была в сосняке брусничниковом, а самой низкой – в сосняке черничниковом), в июле – 4,7°C, изменяясь от 2,3 до 6,4°C (самой низкой она была в нагорном липняке Ботанического сада ПГТУ, а наиболее высокой – в сосняке лишайниково-мшистом). В сентябре различия температуры между разными слоями почвы составили в среднем 1,5°C, варьируя между экотопами от 0,6 до 3,1°C (максимальными они были в сосняке лишайниковом, а минимальными – в сосняках брусничниковом и черничниковом). Летом 2017 года температура почвы была значительно ниже, чем в 2016 году, осенью же положение кардинально изменилось.

Таблица 5

Температура почвы в 2017 году на объектах в заповеднике «Большая Кокшага» и других ООПТ

Экотоп	Дата учета	Средняя температура почвы на разной глубине, °C					
		5 см	10 см	20 см	40 см	60 см	80 см
1. Заповедник, сосняк лишайниковый	24.05	7,8	7,4	7,1	5,3	5,0	4,8
	12.07	14,8	14,0	13,3	11,1	10,5	10,1
	13.09	14,4	13,3	12,5	12,3	11,9	11,6
2. Заповедник, сосняк лишайниково-мшистый	23.05	7,3	6,9	6,5	4,8	4,7	4,5
	12.07	15,1	13,5	12,8	10,6	10,1	9,7
	13.09	12,5	12,0	11,8	11,9	11,6	11,5
3. Заповедник, сосняк-брусничник	23.05	7,6	7,1	6,8	5,1	4,9	4,6
	12.07	13,8	13,1	12,5	10,1	9,5	9,0
	13.09	12,2	12,0	11,8	11,8	11,6	11,3
4. Заповедник, сосняк-черничник влажный с елью	23.05	5,6	5,4	5,3	3,8	3,4	3,3
	12.07	13,6	12,8	12,0	9,7	9,0	8,6
	13.09	12,5	12,3	12,0	12,1	11,8	11,6
5. Заповедник, сосняк-черничник сырой с елью, осиной и березой	24.05	5,7	5,4	5,2	3,7	3,6	-
	13.09	12,5	11,2	10,6	10,7	10,6	-
6. Заповедник, Шаптунгское поле	23.05	8,6	7,8	7,6	6,0	5,8	5,6
	12.07	14,8	13,7	13,1	11,5	11,3	10,3
	13.09	13,2	12,8	12,5	12,7	12,7	12,3
7. Лесопарк «Сосновая роща», пойменный луг	12.05	6,6	6,2	5,9	4,8	4,5	4,3
	21.09	11,2	11,2	11,4	12,5	12,3	12,0
8. Лесопарк «Сосновая роща», пойменный смешанный лес	12.05	6,0	5,7	5,3	3,9	3,7	3,6
	21.09	11,1	11,3	11,5	12,4	12,3	12,0
9. Ботанический сад ПГТУ, липняк снытевый нагорный	11.05	6,0	5,5	4,9	3,0	2,8	-
	11.07	11,0	10,5	9,8	9,7	9,0	8,5
	22.09	10,0	10,2	10,6	12,1	12,3	12,3

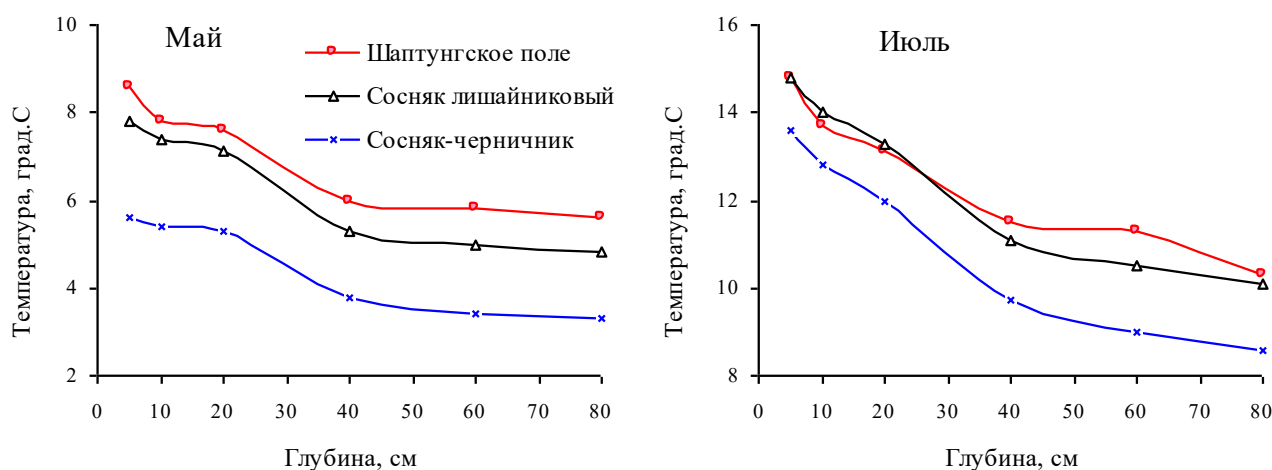


Рис. 9. Изменение температуры почвы по градиенту глубины в различных экотопах заповедника

Заключение. Проведенные нами исследования позволили, таким образом, определить пределы и закономерности изменчивости температуры почвы в условиях Республики Марий Эл. Установлено, что почва характеризуется более сглаженным температурным режимом, по сравнению с приземным слоем атмосферы, и ее средняя годовая температура, которая практически не изменяется с глубиной, выше средней годовой температуры воздуха на 4,2-4,5°C. На глубине всего 20 см температура почвы в течение девяти месяцев (январь-март и июль-декабрь) выше средней месячной температуры воздуха, а на глубине 320 см с апреля по сентябрь она, наоборот, ниже. Связь между многолетними рядами значений средней месячной температуры воздуха и почвы в зимний период довольно слабая, что связано с вариацией толщины снежного покрова в разные годы, а с апреля по октябрь – очень тесная. Очень тесна также связь между средней годовой температурой почвы на глубине 20 см и приземного слоя атмосферы, оцененная по материалам наблюдений различных метеостанций России.

Годовой ход температуры почвы на каждой отметке глубины имеет свои особенности, отражаемые соответствующими уравнениями регрессии. Сезонный минимум на глубине 20 см отмечается чаще всего в конце третьей декады декабря или в середине первой декады января, сдвигаясь на 5-7 дней на каждые 10 см глубины (на глубине 320 см он отмечается уже в конце апреля). Температурный максимум на глубине 20 см наступает в основном в середине июля, а на глубине 320 см – в конце августа или даже сентября. Термический режим почвы зависит от их гранулометрического состава и влажности, а также характера растительного покрова и хозяйственного использования земель (на селитебных территориях и сельскохозяйственных угодьях температура почвы выше, чем в лесу).

Значения средней температуры почвы в летне-осенний период и годового максимума имеют четкую тенденцию к увеличению, связанную с глобальным потеплением климата, что подтверждают данные исследователей по другим регионам России. Не остается также постоянной во времени продолжительность периодов с различной температурой почвы и суммы накопленного тепла, величина которых медленно, но неуклонно возрастает от года к году, что приводит летом к возрастанию разности между температурой почвы и воздуха. Годовой же минимум температуры и глубина промерзания почвы тренда практически не имеют, флуктуируя вокруг некоторого среднего уровня. Повышение температуры почвы приводит к улучшению условий роста растений и усилению деятельности почвенной биоты, которая, разлагая органическое вещество, выделяет в атмосферу углекислый газ и метан, увеличивая парниковый эффект.

Для глубокого понимания роли микроклимата почв в функционировании лесных биогеоценозов необходимо во всех заповедниках, национальных парках и ботанических садах орга-

низывать регулярные сопряженные наблюдения, которые помогут выявить существующие тенденции его изменения и оценить реакцию на них биоты.

Библиографический список

1. Архангельская, Т.А. Температурный режим комплексного почвенного покрова / Т.А. Архангельская. – М.: ГЕОС, 2012. – 282 с.
2. Балыбина, А.С. Дендроиндикация температуры почвы в котловинах байкальского типа / А.С. Балыбина, И.Е. Трофимова // География и природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 58-65.
3. Битюков, Н.А. Температурный режим бурых лесных почв под букняками / Н.А. Битюков // Известия Сочинского государственного университета. – 2012. – № 3 (21). – С. 219-223.
4. Галенко, Э.П. Формирование теплового режима почв хвойных экосистем бореальной зоны в зависимости от лесообразующей породы и типа леса / Э.П. Галенко // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – Вып. 1 (13). – С. 32-37.
5. Демаков, Ю.П. Пространственное изменение температуры почвы в суходольных и пойменных биогеоценозах / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». Вып. 6. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2013. – С. 39-47.
6. Демаков, Ю.П. Характер изменения параметров микроклимата почв в лесных биогеоценозах Республики Марий Эл [Электронный ресурс] / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев, С.Н. Бродников, В.Г. Краснов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международ. конф. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 34-43. – URL: <http://www.volgatech.net/international-cooperation-department/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/publications/>
7. Демаков, Ю.П. Роль лесной подстилки в борах Марийского Заволжья и вариабельность ее параметров / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев, Р.Н. Шарафутдинов // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». Вып. 8. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – С. 15-43.
8. Десяткин, Р.В. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии / Р.В. Десяткин, А.Р. Десяткин, П.П. Федоров // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI, № 2. – С. 70-78.
9. Кулькова, Л.В. Сезонная динамика температуры почв лесных и открытых биотопов заповедника «Басеги» / Л.В. Кулькова, Н.Г. Шавалиева // Вестник Пермского университета. – 2011. – Вып. 3-4. – С. 45-49.
10. Макарычев С.В. Сезонная динамика запасов тепла в дерново-подзолистых почвах ленточных боров / С.В. Макарычев, В.И. Пастухов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 4 (102). – С. 24-27.
11. Макарычев, С.В. Формирование гидротермического режима почвы под древесными породами в условиях дендрария / С.В. Макарычев, Л.В. Лебедева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – 5 (139). – С. 44-49.
12. Татаринцев, Л.М. Природная динамика физических и теплофизических свойств почв / Л.М. Татаринцев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (19). – С. 36-41.
13. Худяков, О.И. Лесорастительные свойства почв лесотундры в связи с потеплением климата / О.И. Худяков, О.В. Решоткин // Современные проблемы притундровых лесов. – Архангельск: САФУ, 2012. – С. 115-122.
14. Шульгин, А. М. Климат почвы и его регулирование / А.М. Шульгин. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 341 с.
15. Lafleur, B. Response of northeastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration? / B. Lafleur, D. Paré, A.D. Munson, Y. Bergeron / Environmental Reviews. – 2010. – Vol. 1. – P. 279-289.
16. Gewehr, S. Soil characteristics mediate the distribution and response of boreal trees to climatic variability / S. Gewehr, I. Drobyshev, F. Berninger, Y. Bergeron // Canadian Journal of Forest Research. – 2014. – Vol. 44(5). – P. 487-498.
17. Mellander, P.E. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands / P.E. Mellander, M.O. Löfvenius, H. Laudon // Climatic Change. – 2007. – Vol. 85. – Issue 1-2. – P. 179-193.
18. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991. Eds. G. Gutman, R. Volker. – 2017, Springer International Publishing. – P. 173-192
19. Zhang, X. Temperature and precipitation trends in Canada during the twentieth century / X. Zhang, L.A. Vincent, W.D. Hogg, A. Niitsoo // Atmosphere-Ocean, 2000. – 38. – P. 395-429.

References

1. Arhangel'skaya, T.A. Temperaturnyj rezhim kompleksnogo pochvennogo pokrova (Temperature regime of complex soil cover), T.A. Arhangel'skaya, Moscow, 2012, 282 p.
2. Balybina, A.S. Dendroindikaciya temperatury pochvy v kotlovinah bajkal'skogo tipa (Dendroindication of soil temperature in Baikal-type depressions), A.S. Balybina, I.E. Trofimova, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2013, No. 2, Pp. 58-65.
3. Bitjukov, N.A. Temperaturnyj rezhim buryh lesnyh pochv pod buknyakami (Temperature regime of brown forest soils under the beech trees), N.A. Bitjukov, *Izvestiya Sochinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, Vol. 3, No. 21, Pp. 219-223.

4. Galenko, Eh.P. Formirovanie teplovogo rezhima pochv hvoynyh ehkossistem boreal'noj zony v zavisimosti ot lesoobrazuyushchej porody i tipa lesa (Formation of the thermal regime of the soil of coniferous ecosystems of the boreal zone depending on the forest tree species and forest type), Eh.P. Galenko, *Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN*, 2013, Vol. 1, No. 13, Pp. 32-37.
5. Demakov, Yu.P. Prostranstvennoe izmenenie temperatury pochvy v suhodol'nyh i pojmennyh biogeocenozaх (Spatial change in soil temperature in upland and floodplain biogeocenosés), Yu.P. Demakov, A.V. Isaev, *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaya Kokshaga»*, Joshkar-Ola, 2013, Vol. 6, Pp. 39-47.
6. Demakov, Yu.P. Harakter izmeneniya parametrov mikroklimata pochv v lesnyh biogeocenozaх Respubliki Marij El (The nature of changes in soil microclimate parameters in the forest biogeocenosés of the Republic of Marij El), Yu.P. Demakov, A.V. Isaev, S.N. Brodnikov, V.G. Krasnov, Proc. Conf. *Lesnye ehkossistemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring*, Joshkar-Ola, 2016, Pp. 34-43, available at: <http://www.volgatech.net/international-cooperation-department/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/publications/>
7. Demakov, Yu.P. Rol' lesnoj podstilki v borah Marijskogo Zavolz'hya i variabel'nost' ee parametrov (The role of forest litter in the forests of the Mari Trans-Volga region and the variability of its parameters), Yu.P. Demakov, A.V. Isaev, R.N. Sharafutdinov, *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaya Kokshaga»*, Joshkar-Ola, 2017, Vol. 8, Pp. 15-43.
8. Desyatkin, R.V. Temperaturnyj rezhim merzlotno-taezhnyh pochv Central'noj Yakutii (Temperature regime of frozen-taiga soils of Central Yakutia), R.V. Desyatkin, A.R. Desyatkin, P.P. Fedorov, *Kriosfera Zemli*, 2012, Vol. XVI, No. 2, Pp. 70-78.
9. Kul'kova, L.V. Sezonnaya dinamika temperatury pochv lesnyh i otkrytyh biotopov zapovednika «Basegi» (Seasonal dynamics of soil temperature in forest and open biotopes of the Reserve «Basegi»), L.V. Kul'kova, N.G. Shavaliyeva, *Vestnik Permskogo universiteta*, 2011, Vol. 3-4, Pp. 45-49.
10. Makarychev S.V. Sezonnaya dinamika zapasov tepla v dernovo-podzolistykh pochvah lentochnyh borov (Seasonal dynamics of heat reserves in sod-podzolic soils of belt burs), S.V. Makarychev, V.I. Pastuhov, *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, Vol. 4, No. 102, Pp. 24-27.
11. Makarychev, S.V. Formirovanie gidrotermicheskogo rezhima pochvy pod drevesnymi porodami v usloviyah den-drariya (Formation of the hydrothermal regime of the soil under tree species under arboretum conditions), S.V. Makarychev, L.V. Lebedeva, *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, Vol. 5, No. 139, Pp. 44-49.
12. Tatarincev, L.M. Prirodnaya dinamika fizicheskikh i teplofizicheskikh svojstv pochv (Natural dynamics of soil physical and thermophysical properties), L.M. Tatarincev, *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, Vol. 3, No. 19, Pp. 36-41.
13. Hudyakov, O.I. Lesorastitel'nye svojstva pochv lesotundry v svyazi s potepleniem klimata (Forest vegetation properties of forest tundra soils due to climate warming), O.I. Hudyakov, O.V. Reshotkin, *Sovremennyye problemy pritundrovyyh lesov*, Arhangel'sk, 2012, Pp. 115-122.
14. Shul'gin, A. M. Klimat pochvy i ego regulirovanie (Soil climate and its regulation), A.M. Shul'gin, 1967, 341 p.
15. Lafleur, B. Response of northeastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration, B. Lafleur, D. Paré, A.D. Munson, Y. Bergerona, *Environmental Reviews*, 2010, Vol. 1, Pp. 279-289.
16. Gewehr, S. Soil characteristics mediate the distribution and response of boreal trees to climatic variability, S. Gewehr, I. Drobyshev, F. Berninger, Y. Bergeron, *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, Vol. 44, No. 5, Pp. 487-498.
17. Mellander, P.E. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands, P.E. Mellander, M.O. Löfvenius, H. Laudon, *Climatic Change*, 2007, Vol. 85, No. 1-2, Pp. 179-193.
18. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, 2017, Pp. 173-192.
19. Zhang, X. Temperature and precipitation trends in Canada during the twentieth century, X. Zhang, L.A. Vincent, W.D. Hogg, A. Niitsoo, *Atmosphere-Ocean*, 2000, Vol. 38, Pp. 395-429.

УДК 574.45+630*182

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ХВОИ И КАМБИЯ СРЕДНЕГО ДЕРЕВА В КУЛЬТУРАХ СОСНЫ РАЗНОЙ ИСХОДНОЙ ГУСТОТЫ

Ю. П. Демаков, Т. В. Нуреева

Поволжский государственный технологический университет

Влияние густоты древостоя на производительность хвои древесных растений изучено пока недостаточно, отсутствуют сведения о производительности камбия. В решении данной проблемы перспективным направлением может стать имитационное моделирование. Приведены результаты моделирования динамики продуцирования массы стволовой древесины ассимиляционным аппаратом и камбием средних по размерам деревьев сосны в культурах сосны разной начальной густоты, созданных в условиях сухого бора Республики Марий Эл. В

древостоях с густотой посадки 5 тыс. экз./га биомасса хвои возрастает до 40-летнего возраста, после чего остается на неизменном уровне. В редких культурах прирост фитомассы стволовой древесины увеличивается постепенно, достигая максимума лишь в возрасте 60-65 лет. Установлено, что производительность хвои и камбия средних по показателям деревьев снижается по мере увеличения их возраста и густоты культур, увеличение которой выше 3 тыс. экз./га в возрасте 20 лет нецелесообразно, поскольку это приводит к снижению эффективности работы ассимиляционного аппарата и камбия деревьев, в результате чего они производят меньшую массу стволовой древесины. В более же редких культурах средние по размерам деревья наиболее полно депонируют углекислоту, эффективно используя солнечную энергию для образования биомассы. Для повышения эффективности работы хвои и камбия деревьев необходимо оптимизировать не только начальную, но и текущую густоту культур, своевременно проводя рубки ухода. На основе проведенного исследования для условий сухих и свежих боров разработан норматив оптимальной текущей густоты культур, при которой, благодаря наиболее эффективной работе ассимиляционного аппарата и камбия деревьев, обеспечивается наивысший годичный прирост стволовой древесины.

Ключевые слова: сосна; лесные культуры; фитомасса, ассимиляционный аппарат; камбий; стволовая древесина; производительность; имитационное моделирование.

PRODUCTIVITY OF NEEDLES AND CAMBIUM IN PINE TREES WITH DIFFERENT INITIAL DENSITY

Yu.P. Demakov, T.V. Nureeva
Volga State University of Technology

The interrelation between the stand density and the productivity of needles in woody plants has been understudied in research literature. There are insufficient data about cambium productivity. Simulation modeling may become an effective tool for addressing this problem. The paper provides the results of modeling demonstrating the dynamics of mass production of stem wood using assimilation apparatus and cambium of medium-sized pine trees with different initial density obtained in the conditions of dry forest of the Republic of Mari El. In stands with the planting density of 5 thousand trees/ha, needle biomass increases up to 40 years of age, after which it stabilizes. In less dense stands, the increase of stem wood biomass occurs gradually, reaching its maximum only at 60-65 years of age. It has been established that the productivity of needles and cambium in medium-sized trees decreases with ageing and density increase. The density of over 3 thousand trees/ha at 20 years of age has little economic sense as it leads to the decrease of assimilation effectiveness and cambium of trees. As a result there is a decrease in stem biomass. In more dense stands, medium-sized trees better deposit carbon dioxide by way of effective use of solar energy to produce biomass. In order to improve the effectiveness of needle and cambium biomass, it is necessary to optimize stand density by means of thinning. Based on the conducted research we obtained the optimal value of stand density for dry and fresh forests, which ensures effective operation of assimilation apparatus and cambium of trees and results in maximum annual increment.

Keywords: pine-tree; forest crops; phytomass; assimilation apparatus; cambium; stemwood; productiveness; simulation modeling.

Введение. Лесные экосистемы непрерывно изымают из атмосферы углерод, преобразуя его в процессе фотосинтеза в органическое вещество, благодаря чему выполняют важнейшую функцию в биосферных процессах и стабилизации климата на нашей планете. Наравне с естественными древостоями эту роль выполняют посаженные человеком леса, площадь которых в мире из года в год увеличивается и составляет 277,9 млн га, или 6,95% от общей площади лесов (Раун et al., 2015). Лесные экосистемы важны как источники и поглотители атмосферного CO₂, а также для хранения углерода в фитомассе, подстилке и почве

(Курбанов, 2002; Kurbanov et al., 2007; Hall, 2008). Величина поглощения углерода зависит при этом от деятельности ассимиляционного аппарата и камбия деревьев, образующих единую систему, устойчивое функционирование которой регулируется механизмом отрицательной обратной связи. Ассимиляционный аппарат обеспечивает все органы дерева энергией, превращенной им в процессе фотосинтеза в органическое вещество, которое камбий с водным током доставляет к корням.

Познанием закономерностей изменения производительности листы и камбия деревьев в процессе их роста исследователи занимаются, как показал в своем детальном обзоре В.А. Усольцев (2017), уже давно. Установлено, к примеру, что масса и производительность ассимиляционного аппарата связана не только с годичным приростом ствола, но также с возрастом, высотой, диаметром и ранговым положением дерева в ценозе (Нагимов, 1987; Усольцев, 1988, 1997). Показано также, что масса хвои или листы деревьев не может превышать некоторого предела и ее прирост в верхней части кроны сбалансирован отмиранием в нижней части вследствие нехватки солнечной радиации. Р. Vanninen и А. Mäkelä (2000) изучали влияние возраста, размера и статуса конкурентоспособности деревьев на листы и производство древесины 43 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на юге Финляндии. Согласно их исследованиям, отстающие в росте деревья продуцируют больше древесины, чем доминирующие деревья, и рост их ствола на единицу массы листы был больше, а деревья в насаждениях с более высокой плотностью отличаются более интенсивным ростом ствола дерева в высоту, чем деревья в редких древостоях. Группой ученых (Innes et al., 2005) была найдена связь между индексом площади листа (LAI) и увеличением запаса древостоя. Использование LAI как инструмента для лучшего понимания роста древостоя и его использования при управлении ростом насаждений, по их мнению, является важной областью исследований. Влияние же на производительность листы (хвои) деревьев различных экологических факторов, в том числе густоты древостоя, изучено пока крайне слабо.

Одним из перспективных путей решения этой задачи, которая сопряжена с большими трудностями методического характера, является имитационное моделирование, основанное на закономерностях изменения параметров деревьев и массы их фракций, выраженных в форме регрессионных уравнений. Математические модели выступают при этом не только как средство описания конкретных эмпирических данных, но и как метод познания анализируемых явлений.

Цель работы заключалась в оценке влияния исходной густоты культур сосны на производительность хвои и камбия средних по размерам деревьев, что необходимо для выбора оптимального режима их выращивания.

Материал и методика. Объектом исследования являлись культуры сосны обыкновенной разной начальной густоты (от 0,5 до 10 тыс. экз./га), созданные в 1977 году на площади 7 га, расчищенной от погибшего в результате пожара 50-летнего соснового древостоя естественного происхождения. Рельеф участка ровный, почва дерново-слабоподзолистая песчаная, тип условий произрастания – А₁₋₂, тип леса – сосняк лишайниковый. На объекте в 1988, 1991, 1996, 1999, 2003, 2008, 2011 и 2018 годах проведена оценка состояния древостоя с полным перечетом деревьев и обмером их высоты у 15...20 средних по размерам экземпляров. Производительность ассимиляционного аппарата деревьев, являющаяся одной из важнейших характеристик продукционного процесса, рассчитывали как отношение величины текущего годичного прироста абсолютно сухой массы стволовой древесины к массе хвои в предшествующем году, а производительность камбия – как отношение годичного прироста массы стволовой древесины к площади поверхности луба. Цифровой эмпирический материал обработан общепринятыми методами математической статистики на ПК с использованием пакетов стандартных прикладных программ Excel и Statistica.

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что влияние исходной густоты культур на состояние и таксационные параметры древостоя более или менее отчетливо проявилось уже в возрасте пяти лет и по мере его увеличения различия становились все более выраженными (Демаков, Калинин, 1997; Демаков и др., 2002, 2016). Изменение средней высоты и среднего диаметра древостоев с их возрастом описывают соответствующие уравнения регрессии (табл. 1). Обобщенные математические модели, обеспечивающие не только очень высокую точность аппроксимации исходных данных ($p < 0,001$), но и учитывающие усиливающееся с возрастом (А, лет) влияние исходной густоты древостоя (N, тыс. экз./га), имеют следующий вид:

$$H_{\text{ср.}} = (24,82 - 0,174 \cdot N) \cdot \{1 - \exp[-(27,46 - 0,656 \cdot N) \cdot 10^{-3} \cdot A]\}^{1,516 \cdot \exp(-0,0223 \cdot N)}, R^2 = 0,972;$$

$$D_{\text{ср.}} = 1,816 \cdot (A - 5)^{0,707 \cdot \exp(-0,047 \cdot N)}; R^2 = 0,935.$$

По значениям среднего диаметра (D, см) и высоты (H, м) древостоя можно на основе выявленных нами зависимостей (Демаков, 2014; Демаков, Пуряев, 2015; Демаков и др., 2016) оценить объем (V , м^3), массу ($M_{\text{ствола}}$, кг) и поверхность (S , м^2) ствола среднего дерева, а также массу его хвои ($M_{\text{хвои}}$, кг), используя следующий набор регрессионных уравнений, обеспечивающих надежную аппроксимацию искомым данным:

$$V = 5,18 \cdot 10^{-5} \cdot H^{0,868} \cdot (D + 1)^2, \text{ м}^3,$$

$$M_{\text{ствола}} = 20,13 \cdot 10^{-3} \cdot H^{0,891} \cdot (D + 1)^2, \text{ кг},$$

$$S_{\text{камбия}} = 20,64 \cdot 10^{-3} \cdot (D + 1) \cdot H^{0,963}, \text{ м}^2,$$

$$M_{\text{хвои}} = 22,31 \cdot 10^{-3} \cdot (D + 1)^{1,777}, \text{ кг}.$$

Таблица 1

Параметры уравнений динамики роста деревьев в культурах сосны разной исходной густоты

Параметр уравнения	Значения параметров уравнений для разной начальной густоты культур				
	500 экз./га	1000 экз./га	3000 экз./га	5000 экз./га	10000 экз./га
Средняя высота деревьев, $H = K' [1 - \exp(-a' \cdot 10^{-3} \cdot X)]^b$, м					
K	24,7	24,6	24,3	24,0	22,9
a	27,13	26,80	25,49	24,18	20,24
b	1,499	1,483	1,418	1,356	1,186
R ²	0,997	0,985	0,996	0,994	0,981
Средний диаметр деревьев, $D = a' (X - 5)^b$, см					
a	1,648	1,901	2,058	1,857	0,910
b	0,733	0,663	0,549	0,531	0,707
R ²	0,938	0,953	0,955	0,974	0,994

Расчеты показали, что текущий годичный прирост массы стволовой древесины в культурах густотой 3-5 тыс. экз./га до 25-30-летнего возраста самый высокий и достигает 2,0-2,5 т/га, а затем начинает снижаться. В редких культурах прирост фитомассы стволовой древесины увеличивается постепенно, достигая максимума лишь в возрасте 60-65 лет (рис. 1А). В древостоях с густотой посадки 5 тыс. экз./га биомасса хвои возрастает до 40-летнего возраста, после чего остается на неизменном уровне (рис. 1Б). Динамика фитомассы ассимиляционного аппарата деревьев имеет иной характер, что свидетельствует о разной эффективности его работы в густых и редких культурах. Графически отображено, что за исследуемый период с 15-летнего возраста производительность хвои, отражающая ее работу по производству древесины, постепенно снижается, причем в насаждениях сосны с более высокой густотой 1 кг хвои средних по размерам деревьев производит меньшую массу древесины (рис. 2А). С увеличением начальной густоты в культурах снижается деятельности камбия средних деревьев по производству ежегодного прироста фитомассы древесины (рис. 2Б), причем площадь камбия сосны на гектаре наиболее велика в густых культурах (рис. 3А). Отношение же массы хвои к площади камбия снижается по мере увеличения возраста культур и их густоты (рис. 3Б). Таким образом, в редких культурах средние по размерам деревья более полно де-

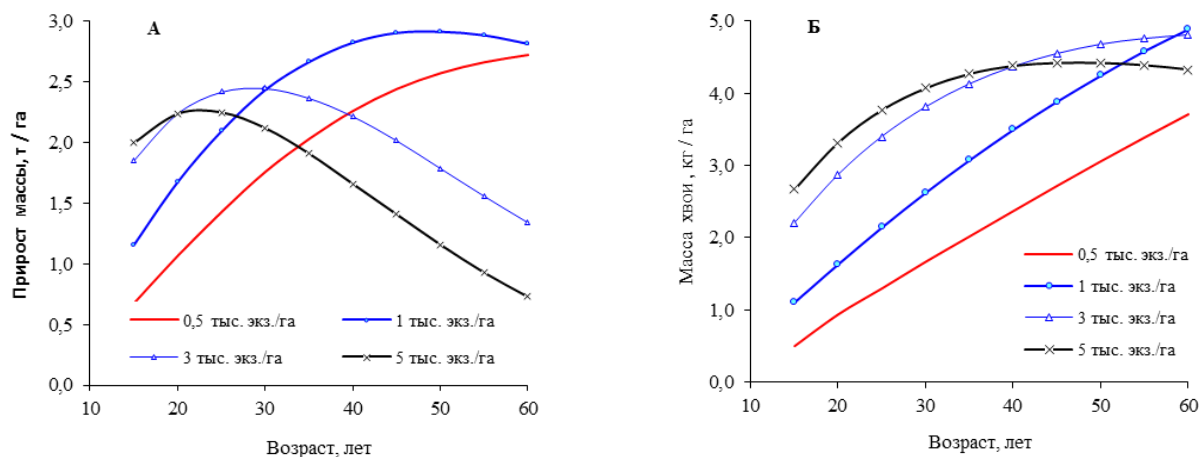


Рис. 1. Динамика текущего годичного прироста массы стволовой древесины (А) и наличного запаса хвой (Б) в культурах сосны разной начальной плотности, созданных в сухом бору

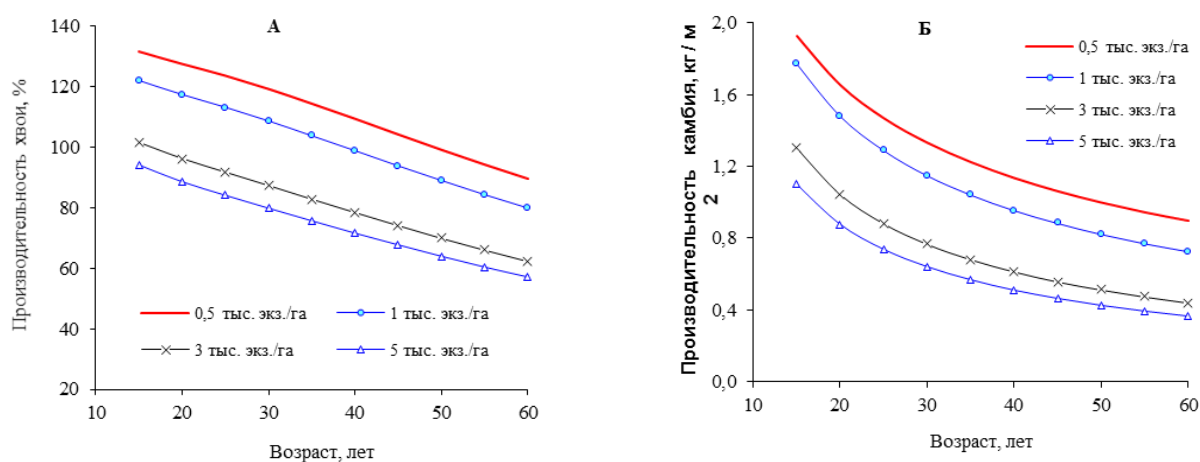


Рис. 2. Динамика производительности хвой (А) и камбия (Б) средних по размерам деревьев сосны в культурах разной начальной плотности, созданных в сухом бору

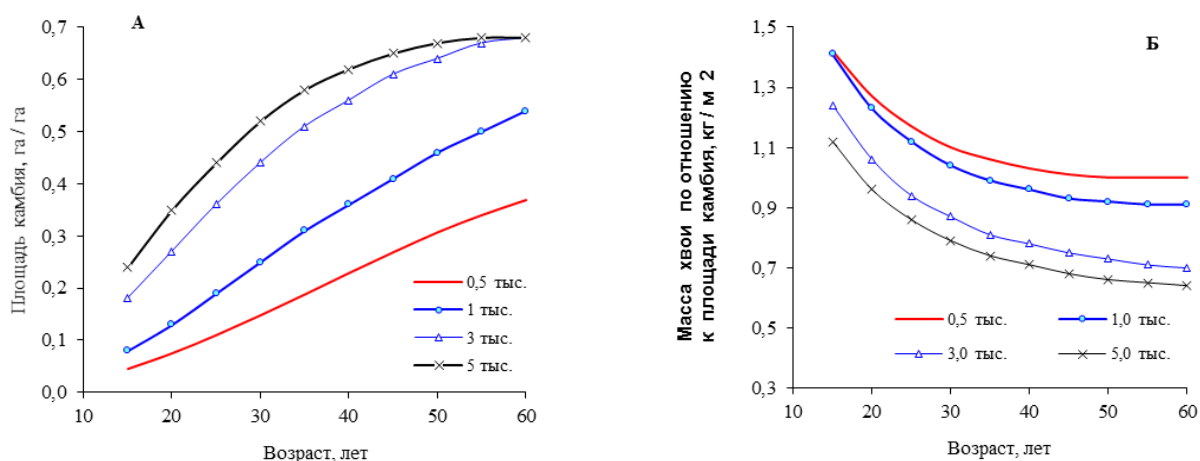


Рис. 3. Динамика площади поверхности камбия деревьев (А) и ее отношения к массе хвой (Б) в культурах сосны разной начальной плотности

понируют углекислоту, эффективно используя солнечную энергию для образования биомассы.

Для повышения эффективности работы хвой и камбия деревьев необходимо оптимизировать не только начальную, но и текущую плотность культур, своевременно проводя рубки ухода. Расчеты, основанные на приведенных выше эмпирических моделях, показали, что она экспоненциально снижается с возрастом культур, постепенно выходя на плато (табл. 2). Эту

закономерность описывает следующее уравнение регрессии:

$$N_{\text{опт.}} = 3500' \exp(-29,52' 10^{-5} A^{2,362}) + 500, R^2 = 0,984;$$

в котором $N_{\text{опт.}}$ – оптимальная текущая густота древостоя, обеспечивающая наиболее эффективную работу ассимиляционного аппарата деревьев и наивысший текущий годичный прирост стволовой древесины, экз./га; A – возраст древостоя, лет.

Таблица 2

Значения параметров древостоя в культурах сосны оптимальной густоты в сухих и свежих борах

Параметр древостоя	Значения параметров древостоя в различном возрасте, лет								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Густота, экз./га	3000	2500	1900	1500	1100	830	670	580	530
Полнота, отн. един.	0,43	0,52	0,60	0,67	0,73	0,78	0,82	0,86	0,90
Запас, м ³ /га	41	75	110	140	162	181	204	237	284
Средняя высота, м	6,5	8,3	10,0	11,5	13,0	14,3	15,5	16,6	17,7
Средний диаметр, см	6,2	8,7	11,3	14,0	16,7	19,5	22,3	25,2	28,2
Проекция кроны, м ²	3,6	5,3	7,2	9,1	11,0	12,9	14,6	16,3	17,8

Значения параметров древостоя в культурах сосны оптимальной густоты, создаваемых в сухих и свежих борах Республики Марий Эл, при которой, благодаря наиболее эффективной работе ассимиляционного аппарата и камбия деревьев, обеспечивается наивысший годичный прирост стволовой древесины, приведены в таблице 2. В возрасте 20 лет оптимальная густота культур сосны составляет 3000 экз./га, к 60-летнему возрасту она снижается до 530 экз./га. Относительная полнота древостоя в начальный период роста культур очень мала, но в последующем она резко увеличивается, достигая к возрасту 60 лет 0,9 относительных единиц. Запас древостоя при этом значении составляет 284 м³/га.

Заключение. Результаты проведенного исследования показывают, что в сухих и свежих борах Республики Марий Эл оптимальная густота в 20-летнем возрасте культур сосны обыкновенной близка к 3,0 тыс. экз./га. Увеличение густоты выращивания свыше 3 тыс. экз./га в данном возрасте нецелесообразно, поскольку это приводит к снижению эффективности работы ассимиляционного аппарата и камбия средних по размерам деревьев, в результате чего они производят меньшую массу стволовой древесины. В более редких культурах деревья со средними показателями наиболее полно депонируют углекислоту, эффективно используя солнечную энергию для образования биомассы. Для повышения эффективности работы хвои и камбия деревьев необходимо оптимизировать не только начальную, но и текущую густоту культур, своевременно проводя рубки ухода. Результаты проведенного исследования позволили разработать для условий сухих и свежих боров норматив оптимальной текущей густоты культур, при которой, благодаря наиболее эффективной работе ассимиляционного аппарата и камбия средних по размерам деревьев, обеспечивается наивысший годичный прирост стволовой древесины.

Библиографический список

1. Демаков, Ю.П. Закономерности развития древостоя в культурах сосны обыкновенной разной исходной густоты / Ю.П. Демаков, Т.В. Нуреева А.С. Пуряев, А.А. Рыжков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2016. – № 4. – С. 19-33.
2. Демаков, Ю.П. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики / Ю.П. Демаков, А.С. Пуряев, В.Л. Черных, Л.В. Черных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 2 (26). – С. 19-36.
3. Демаков, Ю.П. Моделирование развития древостоев и распределения потока ассимилянтов на основе материалов лесоустройства / Ю.П. Демаков, А.С. Пуряев // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – С. 6-19. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.volgatech.net/international-cooperation-department/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/publications/>
4. Демаков, Ю.П. Оптимизация исходной густоты культур сосны в борах Республики Марий Эл / Ю.П. Демаков, К.К. Калинин // Лесохозяйственная информация ВНИИЦлесресурс. – 1997. Вып. 11. – С. 15-21.

5. Демаков, Ю.П. Ствол дерева как деформированный конус / Ю.П. Демаков // Эко-потенциал. – 2014. – № 2. – С. 72-81.
6. Демаков, Ю.П. Экологический подход к оптимизации исходной густоты культур сосны / Ю.П. Демаков, К.К. Калинин, А.И. Шургин, А.В. Иванов, В.А. Закамский, В.А. Матвеев, М.В. Бекмансуров, Г.А. Богданов // Экология и леса Поволжья. Вып. 2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – С. 277-299.
7. Курбанов Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района / Э.А. Курбанов // Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2002. – 300 с.
8. Нагимов З.Я. Масса и продуктивность ассимиляционного аппарата в сосновых древостоях Среднего Урала // Лесная геоботаника и биология древесных растений: сб. науч. тр. Брянск: Брянск. технол. ин-т, 1987. – С. 62-68.
9. Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 762 с.
10. Усольцев, В.А. Продуктивность ассимиляционного аппарата лесообразующих видов в климатических градиентах Евразии // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 4. – С. 52-65.
11. Innes, J.C. Size-density metrics, leaf area, and productivity in eastern white pine / J.C. Innes, M.J. Ducey, J.H. Gove, W.B. Leak, J.P. Barrett // Canadian Journal of Forest Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 2469-2478.
12. Kurbanov, E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity / E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2007. – № 22. – P. 488-499.
13. Hall, M. Effects of future climate on carbon assimilation of boreal Norway spruce: Doctoral Thesis. – Göteborg, Sweden, 2008. – URL: <http://hdl.handle.net/2077/18303>
14. Payn, T. Changes in planted forests and future global implications / T. Payn, J.-M. Carnus, P. Freer-Smith, M. Kimberley, W. Kollert, S. Liu, C. Orazio, L. Rodriguez, L. Neves Silva, M. J. Wingfield // Forest Ecology and Management. – 2015. – № 352. – P. 57-67.
15. Vanninen, P. Needle and stem wood production in Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees of different age, size and competitive status / P. Vanninen, A. Mäkelä // Tree Physiology. – 2000. – № 20. – P. 527-533.

References

1. Demakov, Yu.P. Zakonomernosti razvitiya drevostoya v kul'turah sosny obyknovЕННОj raznoj iskhodnoj gustoty (Patterns of development of the stand in the cultures of Scots pine of different initial density), Yu.P. Demakov, T.V. Nureeva A.S. Puryaev, A.A. Ryzhkov, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, No. 4, Pp. 19-33.
2. Demakov, Yu.P. Ispol'zovanie allometricheskikh zavisimostej dlya ocenki fitomassy razlichnyh frakcij derev'ev i modelirovaniya ih dinamiki (The use of allometric dependencies to estimate the phytomass of various fractions of trees and modeling their dynamics), Yu.P. Demakov, A.S. Puryaev, V.L. Chernyh, L.V. Chernyh, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 2, No. 26, Pp. 19-36.
3. Demakov, Yu.P. Modelirovanie razvitiya drevostoev i raspredeleniya potoka assimilyantov na osnove materialov lesoustrojstva (Modeling the development of forest stands and the distribution of the flow of assimilates based on forest inventory materials), Yu.P. Demakov, A.S. Puryaev, *Lesnye ehkositemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring*, Yoshkar-Ola, 2015, Pp. 6-19, available at: <http://www.volgatech.net/international-cooperation-department/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/publications/>
4. Demakov, Yu.P. Optimizaciya iskhodnoj gustoty kul'tur sosny v borah Respubliki Marij El (Optimization of the initial density of pine crops in the mountains of the Republic of Mari El), Yu.P. Demakov, K.K. Kalinin, *Lesnohozyajstvennaya informaciya VNIIClesresurs*, 1997, Vol. 11, Pp. 15-21.
5. Demakov, Yu.P. Stvol dereva kak deformirovannyj konus (Tree trunk as a deformed cone), Yu.P. Demakov, *Eko-potencial*, 2014, No. 2, Pp. 72-81.
6. Demakov, Yu.P. Ekologicheskij podhod k optimizacii iskhodnoj gustoty kul'tur sosny (Ecological approach to optimizing the initial density of pine crops), Yu.P. Demakov, K.K. Kalinin, A.I. Shurgin, A.V. Ivanov, V.A. Zakamskij, V.A. Matveev, M.V. Bekmansurov, G.A. Bogdanov, *Ekologiya i lesa Povolzh'ya*, Yoshkar-Ola, 2002, Vol. 2, Pp. 277-299.
7. Kurbanov, E.A. Byudzheth ugleroda sosnyh ehkositem Volgo-Vyatskogo rajona (The carbon budget of pine ecosystems of the Volga-Vyatsky district), E.A. Kurbanov, Yoshkar-Ola, 2002, 300 p.
8. Nagimov, Z.Ya. Massa i produktivnost' assimilyacionnogo apparata v sosnyh drevostoyah Srednego Urala (Mass and productivity of the assimilation apparatus in the pine stands of the Middle Urals), Proc. Conf. *Lesnaya geobotanika i biologiya drevesnyh rastenij*, Bryansk, 1987, Pp. 62-68.
9. Usol'cev, V.A. Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: normativy i ehlementy geografii (Phytomass of the forests of Northern Eurasia: standards and elements of geography), V.A. Usol'cev, Ekaterinburg, 2002, 762 p.
10. Usol'cev V.A. Produktivnost' assimilyacionnogo apparata lesoobrazuyushchih vidov v klimaticheskikh gradientah Evrazii (Efficiency of the assimilation apparatus of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2017, No. 4, Pp. 52-65.
11. Innes, J.C. Size-density metrics, leaf area, and productivity in eastern white pine, J.C. Innes, M.J. Ducey, J.H. Gove, W.B. Leak, and J.P. Barrett, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, Vol. 35, Pp. 2469-2478.
12. Kurbanov, E.A. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity, E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, No. 22, Pp. 488-499.

13. Hall, M. Effects of future climate on carbon assimilation of boreal Norway spruce, Sweden, 2008, available at: <http://hdl.handle.net/2077/18303>
14. Payn, T. Changes in planted forests and future global implications, T. Payn, J.-M. Carnus, P. Freer-Smith, M. Kimberley, W. Kollert, S. Liu, C. Orazio, L. Rodriguez, L. Neves Silva, M. J. Wingfield, *Forest Ecology and Management*, 2015, No. 352, Pp. 57-67.
15. Vanninen, P. Needle and stem wood production in Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees of different age, size and competitive status, P. Vanninen, A. Mäkelä, *Tree Physiology*, 2000, No. 20, Pp. 527-533.

УДК 630*237.2

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЛОЩАДИ УЧАСТКОВ ОСТРОВНОГО МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ В СВЯЗИ С ИХ ГЕОГРАФИЧЕСКИМ ПОЛОЖЕНИЕМ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ

В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая

Сыктывкарский лесной институт Санкт-Петербургского государственного
лесотехнического университета им. С. М. Кирова

*В статье изложены результаты изучения островных участков кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Республике Коми. Такие насаждения отличаются богатством видового разнообразия, характеризуются высокими запасами древесины и являются хранилищами региональных генетических лесных ресурсов. Темнохвойные с кедром насаждения составляют девственные лесные массивы и включены в систему особо охраняемых природных территорий республики. Насаждения с кедром сибирским в Республике Коми характеризуются высоким возрастом (до 340-480 лет), достаточно высокой производительностью (III-IV класс бонитета), запасом до 350-385 м³/га. Естественное возобновление кедра отмечено на 88% пробных площадей. Это свидетельствует о непрерывности возобновительного процесса этой породы. За границами сплошного ареала участки островного кедра отмечены от 61,76 до 66,46 градуса северной широты, и от 49,75 до 62,33 градуса восточной долготы. На качественном (25%) уровне значимости совокупным влиянием широтного и меридионального положения определяется около 15 % изменчивости площади участков островного кедра. Это подтверждает представление о климатической обусловленности северной границы ареала кедра и указывает на то, что при обосновании положения западной границы ареала наряду с антропогенными факторами должен учитываться также и вклад климатической составляющей. Для формирования границ ареала кедра важное значение имеет естественный дренаж территории. Это известное положение подтверждается достоверной связью между густотой возобновления кедра на пробных площадях и расстоянием от этих пробных площадей до ближнего канала на объектах с искусственным дренажем ($R = 0,80$; $R_{0,05} = 0,71$). По данным метеостанций Республики Коми, долговременная тенденция повышения температуры может иметь противоположную общепринятым представлениям направленность. В связи с этим, при общей тенденции потепления климата, в отдельных районах республики не обязательно следует ожидать смещения северной границы лесной растительности, в т.ч. островных участков кедра, в северном направлении.*

Ключевые слова: кедр сибирский, Республика Коми, ареал, островное местонахождение, климат, естественный и искусственный дренаж.

ASSESSMENT OF AREA VARIABILITY OF ISLAND PLOTS OF THE SIBERIAN STONE PINE IN CONNECTION WITH THEIR GEOGRAPHICAL LOCATION IN THE KOMI REPUBLIC

V. V. Pakhuchiy, L. M. Pakhuchaya

Syktyvkar forest institute of the St. Petersburg state forest-technical university of S. M. Kirov

*The article presents the research results of island plots of a Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in the Komi Republic. Such stands are characterized by broad species variety, high tim-*

ber stocks, and they are regarded as storages of regional genetic forest resources. Dark-coniferous stands with a Siberian Stone Pine compose virgin forests and they are included in the system of especially protected natural territories of the republic. Stands containing Siberian Stone Pine in the Komi Republic are characterized by old age (340 – 480 years) and rather high productivity (III-IV site class), with an increment of 350-385 m³/hectare. Natural regeneration of a Siberian Stone Pine has been observed on 88% of sample plots. It demonstrates the continuity of regeneration process of this species. Beyond the continuous area, the plots of Siberian Stone Pine have been encountered at 61.76 to 66.46 degrees of the northern latitude, and at 49.75 to 62.33 degrees of the east longitude. At the qualitative level (25%), about 15% of variability of the area of island plots with Siberian Stone Pine have been characterized by cumulative influence of the latitude and meridional location. It confirms the presentation of climatic conditionality of northern border of an area of a Siberian Stone Pine and indicates that at justification of position of the western border of an area along with anthropogenic factors it has to be considered as well the contribution of a climatic component. The natural drainage of the territory has important significance for borders formation of the area of Siberian Stone Pine. This well-known position is confirmed by reliable connection between the density of regeneration of a Siberian Stone Pine on sample plots and distance from these sample plots to the near channel on objects with artificial drainage ($R = 0,80$; $R_{0,05} = 0,71$). According to the dates of meteorological stations of the Komi Republic, the long-term tendency of temperature increase may have a direction opposite to the standard representations. In this regard, under the general tendency of global warming in certain areas of the Republic the northern border of forest vegetation including the island plots of a Siberian Stone Pine will not shift towards the north.

Keywords: Siberian stone pine, the Komi Republic, area, island plots, climate, natural and artificial drainage.

Введение

В Республике Коми проходят границы ареалов многих видов сибирских древесных, кустарниковых и травянистых растений. Наиболее ценным и полезным из них является кедр сибирский (сосна кедровая сибирская – *Pinus sibirica*, Du Tour – «сус-пу» на коми языке). О значении кедр сибирского для формирования таежных ландшафтов, его полезных свойствах и значении для народного хозяйства, распространении темнохвойных с кедром лесов, их происхождении и динамике границ ареала имеется обширная литература (Непомилуева, 1974; Крылов и др., 1983 и др.). Авторы отмечают, что для кедр сибирского характерна фрагментарность ареала (островное произрастание) на его границах, что характерно также для других пород, например ели, и регионов России (Крылов и др., 1983; Callaghan et al., 2002).

Изучение островных местопроизрастаний кедр представляется интересным с теоретической и важным с практической точки зрения направлением исследований. Это объясняется тем, что островные популяции кедр отличаются богатством видового разнообразия, часто включены в мозаику девственных лесных массивов (Пахучий, 1999), могут характеризоваться высокими запасами древесины и являются объектами выявления и сохранения имеющих в регионе генетических лесных ресурсов. Изучение участков островного кедр важно для прогноза сохранности видов в особо охраняемых природных территориях (Козубов, Дегтева, 1996). Границы ареала различных пород, в т.ч. и кедр, во многих случаях обусловлены климатическими условиями (Киселев, 2005 и др.). Островной характер произрастания древесных пород обычно объясняется ухудшением условий произрастания на краях ареала по сравнению с его центральной частью (Крылов и др., 1983). Поэтому изучение изменчивости площади участков островного кедр по мере удаления от границы сплошного ареала может быть полезно с точки зрения количественной оценки климатической обусловленности ареала.

При изучении границ и мозаик растительного, в т.ч. древесного покрова, в последние десятилетия широко используются космические технологии дистанционного зондирования

Земли (Курбанов и др., 2015; Курбанов, 2016). В связи с этим необходимо отметить, что согласно методическим рекомендациям по проведению государственной инвентаризации лесов РФ кедр включен в светлохвойные лесные страты вместе с сосной и лиственницей, тогда как темнохвойные лесные страты объединяют ель, пихту и можжевельник древовидный (Методические рекомендации..., 2011). Возможно, объединения кедров сибирского со светлохвойными породами выполнено по формальному признаку – его названию «сосна сибирская кедровая». В то же время это можно рассматривать как свидетельство недостаточной изученности вопроса об использовании методов дистанционного зондирования для целей инвентаризации темнохвойных с кедром насаждений с типичным преобладанием в их составе ели и пихты. Перспективным для решения этой проблемы могло бы быть использование наработок по дешифрированию космических изображений фрагментированного лесного покрова (Курбанов и др., 2011, Воробьев и др., 2016) и использование снимков высокого разрешения. В последнем случае возможно получение количественной оценки морфологической характеристики крон кедров, слагающего верхний ярус насаждений.

Методы и объекты исследования

Таксационное описание насаждений и естественного возобновления выполнили общепринятыми в лесной таксации и лесоводстве методами (Методические рекомендации..., 2011). Типы леса приняты по типологии В.Н. Сукачева (Сукачев, 1972). Классы бонитета определяли по шкале М.М. Орлова.

Возраст ели, пихты и тонкомерного кедров определяли с помощью возрастного бурава. Для толстомерных деревьев кедров с сердцевинной гнилью возраст рассчитывался на основе данных о ширине годовых колец живой древесины. При математическом описании взаимосвязей использовали регрессионный анализ.

Кедр обычно не формирует чистых древостоев и входит в состав темнохвойных насаждений с преобладанием в их запасе ели и пихты. В связи с тем, что разделение ареала кедров на сплошной и разорванный достаточно условно, при оценке взаимосвязи площади участков островного кедров в связи с их географическим положением использовали характеристики географической широты и долготы геометрического центра участков.

В основу работы положены материалы собственных исследований в массивах темнохвойного леса с участием кедров сибирского и его островного произрастания в Комсомольском, Троицко-Печорском, Вуктыльском и Корткеросском лесничествах Республики Коми (Пахучая, 2000а, 2000б, 2005, 2014; Пахучий, 1997, 1999), входящих в Северо-таежный район европейской части РФ, Северо-Уральский, Двинско-Вычегодский и Западно-Уральский таежные районы (Приказ ..., 2016). Также использованы данные, представленные в кадастре особо охраняемых природных территорий Республики Коми (Кадастр..., 2014), информационных материалах сайта ИАС «ООПТ России» (Информационно-аналитическая система..., 2018), материалах геопортала Республики Коми (раздел «Особо охраняемые природные территории»).

В таблице 1 приведены наименования кедровых заказников и памятников природы, в таблице 2 – общая характеристика насаждений с преобладанием в их составе кедров сибирского в границах сплошного ареала (Вуктыльское, Троицко-Печорское и Комсомольское лесничества) и его островного произрастания (Корткеросское лесничество – кедровый заказник «Лесной массив на водоразделе ручья Суска-Ель и реки Пьянко»).

Результаты исследования

В настоящее время принято, что северная граница ареала кедров климатическая (Непомилуева, 1974). Кедр успешно возобновляется в островных местопроизрастаниях, удаленных от сплошного ареала на расстояние до 150 км на север. Анализируя условия, обеспе-

Таблица 1

Кедровые заказники и памятники природы Республики Коми

ООПТ (наименование)	Площадь, га	Широта, десятичные град.СШ	Долгота, десятичные град.ВД
Ботанический (кедровый) памятник природы «Кедр на острове Медвежий»	0,1	66,46	52,42
Ботанический (кедровый) памятник природы «Юнъяхаты»	25	66,37	62,33
Комплексный заказник «Понью-Заостренная»	7020	66,30	58,94
Ботанический памятник природы «Вадгарты»	70	65,77	59,52
Кедровый памятник природы «Соколово»	100	65,33	56,94
Ботанический (кедровый) памятник природы «Кременьельский»	13	65,16	56,52
Ботанический (кедровый) памятник природы «Кедровка»	1424	64,83	57,75
Ботанический (кедровый) памятник природы «Кедръель»	25	63,17	50,20
Биологический (кедровый) заказник «Сускин-Ель»	2931	62,95	54,18
Кедровый памятник природы «Порожский»	35	63,90	53,83
Кедровый заказник «Сопляский»	883	64,38	57,80
Кедровый заказник «Подчерский»	1665	63,83	57,65
Ботанический (кедровый) памятник природы «Кочмасский»	25	62,03	49,75
Комплексный заказник «Вишерский»	10035	62,45	52,05
Кедровый заказник «Потводельежд»	740	62,41	52,87
Лесной заказник «Лесной массив на водоразделе ручья Суска-Ель и реки Пьянко»	2013	61,59	51,85
Ботанический (кедровый) памятник природы «Войвожский»	13	62,20	54,12
Ботанический памятник природы «Габшорский»	25	62,20	54,19
Ботанический (кедровый) памятник природы «Куломью»	55	61,69	53,69
Ботанический памятник природы «Лунвожский»	84	61,40	52,86
Ботанический (кедровый) памятник природы «Нижевочевский»	8	61,20	54,17
Биологический (ботанический) заказник «Сойвинский»	2350	62,75	55,83
Лесной заказник «Расью»	400	62,14	56,60
Комплексный заказник «Уньинский»	32600	61,76	57,90

чивающие возобновление кедра при недостатке тепла, авторы отмечают, что кедр лучше возобновляется на более прогреваемых, сухих песчаных, супесчаных и легкосуглинистых почвах, предпочитая склоны южных экспозиций. В таких условиях насаждения с кедром сибирским в Республике Коми характеризуются высоким возрастом (до 340-480 лет), средней производительностью (III-IV класс бонитета), запасом до 350-385 м³/га. Естественное возобновление кедра отмечено на 88% пробных площадей, что свидетельствует о непрерывности возобновительного процесса (табл. 2).

Экспертные оценки о климатической обусловленности северной границы кедра, по нашему мнению, могли бы быть подтверждены наличием отрицательной взаимосвязи между площадью участков островного кедра (Y, га) и широтой расположения геометрического центра этих участков (X, десятичные град. СШ) (табл. 1) (уравнение (1):

$$Y = - 700,32X + 47026 \quad (R^2 = 0,0413; R = 0,20; R_{0,05} = 0,40; R_{0,10} = 0,34) \quad (1)$$

Таблица 2

Общая характеристика насаждений с преобладанием кедра

Номер пробной площади, лесничество	Преобладающая порода	Запас, м ³ /га	Класс возраста	Класс бонитета по М.М. Орлову	Тип леса по В.Н.Сукачеву	Густота естественного возобновления кедра с переводом в крупный, тыс.шт./га
4, Вукт.	Кд	223	VIII	V	Кедровник чернично-зеленомошный	1,35
6, Вукт.	Кд	370	VIII	IV-V	Кедровник хвощево-сфагновый	0,7
12, Вукт.	Кд	283	X	IV	Кедровник разнотравный	0,8
15, Вукт.	Кд	276	VIII	V	Кедровник хвощево-сфагновый	0,56
2, Вукт.	Кд	150	VIII	V	Кедровник хвощево-сфагновый	0,88
1, Тр.-Печ.	Кд	137	X	IV	Кедровник-долгомошник	0,4
2, Тр.-Печ.	Кд	52	VIII	V	Кедровник-долгомошник	0,4
2, Кортк.	Е	385	VIII	Va	Ельник-черничник влажный	0,2
13, Кортк.	Е	257	VI	Va	Ельник-черничник влажный	0,2
12, Комс.	Кд	300	XVII	III	Кедровник-черничник влажный	0,64
14, Комс.	Кд	350	XIV	IV	Кедровник-черничник влажный	0,64
28, Комс.	Кд	226	XII	IV	Кедровник-черничник влажный	0,25
34, Комс.	Кд	231	XXI	III	Кедровник крупно-папоротниковый	0
43, Комс.	Кд	264	XXIII	III	Кедровник крупно-папоротниковый	0
5, Комс.	Кд	210	XIV	IV	Кедровник-черничник влажный	0,9
1(1), Комс.	Кд	208	XII	IV	Кедровник-черничник влажный	0,9
1(2), Комс.	Кд	229	XVI	IV	Кедровник-черничник влажный	1,1
1(3), Комс.	Кд	215	XIV	IV	Кедровник-черничник влажный	1,0
1(1-4), Комс.	Кд	216	XIV	IV	Кедровник-черничник влажный	1,0

Примечание: 1. Вукт. – Вуктыльское лесничество, Тр.-Печ. – Троицко-Печорское лесничество, Кортк. – Корткеросское лесничество, Комс. – Комсомольское лесничество; 2. Продолжительность класса возраста для кедра принята 20 лет; 3. На пробных площадях 2 и 13 в Корткеросском лесничестве состав насаждений соответственно 6Е4Кд+Б, ед. Пх и 6Е4Кд, ед. Пх, Б, во всех других случаях кедр является преобладающей породой.

Согласно полученной зависимости такая направленность связи наблюдается, т.е. тенденция уменьшения площади «островов» кедра с продвижением в северном направлении подтверждается, хотя связь слабая и недостоверная.

Оценивая возможности климатически обусловленных изменений положения северной границы ареала кедра в отдаленной и ближней перспективе, необходимо учитывать тенденции изменения климата и его флуктуации в регионе. С начала XX века в Европе наблюдается потепление, охватившее главным образом ее северные территории. В связи с этим, видимо, прогноз динамики северной границы тайги в Республике Коми, в т.ч. с участием кедра, можно связывать с этой тенденцией изменения климата. Однако необходимо учитывать, что наряду с климатом существенное влияние на динамические процессы на границе леса и тундры может оказывать антропогенное воздействие. При этом вклад антропогенного влия-

ния в динамику границы между лесом и тундрой противоположен общепринятым представлениям о направленности смещения границы в результате потепления климата (Vlassova, 2002). Кроме этого, для отдельных территорий Республики Коми долговременная тенденция повышения температуры (потепления климата) выражена слабо, или даже наблюдается снижение среднегодовой температуры воздуха.

Согласно данным (Атлас по климату..., 1997) на территории Республики Коми изменения средних годовых температур воздуха за период 1881-1990 гг. по сравнению с периодом 1881-1935 гг. в различных частях республики были различны. Так, повышение температуры за сравниваемые периоды в северных районах составило 0,4°-0,9°, в центральных – 0,2°-0,4°, а в южных – 0,1°-0,2°. В целом наибольшее потепление отмечается в северных районах республики, а в южных потепление уменьшается (Атлас ..., 1997). Однако, по данным конкретных метеостанций, тенденции изменения температуры могут не согласовываться с усредненными данными для всей территории республики. Так, по данным метеостанции в г. Сыктывкаре, расположенной в юго-западной части республики, для периода 1899-2005 гг. отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха (Термограф ..., 2018) (уравнение 2):

$$Y = +0,0066X - 12,178 (R^2 = 0,0232; R = 0,1523; R_{0,05} = 0,22), \quad (2)$$

где X – годы с 1899 по 2005 гг.; Y – средняя годовая температура воздуха, град. С.

В то же время, по данным северной метеостанции, расположенной в п. Усть-Цильма, для периода 1913 – 2005 гг. наблюдается противоположная тенденция (уравнение 3):

$$Y = - 0,0003X - 1,036 (R^2 = 0,00004; R = 0,0063; R_{0,05} = 0,22), \quad (3)$$

где X – годы с 1899 по 2005 гг.; Y – средняя годовая температура воздуха, град. С.

Оценка взаимосвязи между площадью участков островного кедра (Y , га) и долготой расположения геометрического центра этих участков (X , десятичные град. ВД) (см. табл. 1) показала, что площадь островных участков кедра уменьшается при движении от Урала в западном направлении (уравнение 4):

$$Y = + 388,42X - 18822 (R^2 = 0,0309; R = 0,18; R_{0,05} = 0,40; R_{0,10} = 0,34). \quad (4)$$

В данном случае так же, как и при оценке изменения площади участков островного кедра при движении в северном направлении, можем отметить, что данная связь слабая, недостоверная. Можно говорить о тенденции к уменьшению «островов» кедра с продвижением в западном направлении. Поэтому, можно допустить, что положительная направленность связи, описывающая изменение площади островного кедра в меридиональном направлении, может быть обусловлена ухудшением дренажа при движении в западном направлении от горных и предгорных районов Урала, переходом от местоположений с большими уклонами поверхности к территориям с меньшими уклонами. Однако необходимо учитывать, что западная граница сплошного ареала кедра и положение его островных местопроизрастаний в значительной степени сформированы в результате антропогенного воздействия (рубок, пожаров и др.).

Для оценки сочетанного (совместного) влияния широтного и меридионального положения участков на площадь участков островного кедра выполнили множественный регрессионный анализ данных, характеризующих изменение площади «островов» (Y , га) в от широты (LAT , десятичные град., СШ) и долготы (LON , десятичные град., ВД) (уравнение 5):

$$Y = - 1673LAT + 935LON + 57160 (R^2 = 0,15; R = 0,39) \\ (F_2, 21) = 1,85; F_{0,05} = 3,5; F_{0,10} = 2,6; F_{0,25} = 1,5). \quad (5)$$

Таким образом, в результате регрессионного анализа подтверждено влияние географического положения участков островного кедр на их площадь. Площадь участков островного кедр уменьшается при движении в северном направлении и по мере удаления в меридиональном направлении от Урала. Статистически доказана достоверность оценки, хотя и на невысоком (25%) уровне значимости. При объяснении сравнительно невысокого вклада географического положения участков в изменчивость их размеров и площади (около 15%) необходимо учитывать следующее. Включенные в массив для совместной обработки объекты представлены различными категориями особо охраняемых природных территорий (ботанические «кедровые» памятники природы, биологические «кедровые» заказники, кедровые заказники, комплексные заказники, лесные заказники, ботанические памятники природы). Различные категории особо охраняемых природных территорий ориентированы на сохранение не только кедр сибирского, но других видов редких и исчезающих растений и представителей животного мира. Это снижает точность оценки размеров и площади участков, обеспечивающих сохранение только кедр сибирского, и ведет к ослаблению тесноты связи между рассматриваемыми показателями (уравнение (5)). Таким образом, видимо, акцентирование внимания на климатическую обусловленность только северной границы кедр сибирского не вполне правомерно. Западная граница ареала кедр сибирского в Республике Коми простирается с севера на юг более, чем на 500 км, поэтому при обосновании ее положения наряду с антропогенными факторами должен учитываться также и вклад климатической составляющей. При этом при формировании северной границы ареала существенным является вклад такого фактора, как естественный дренаж, определяемый близостью к водотокам и приуроченностью к склонам.

С указанием на значение естественного дренажа для роста кедр согласуются результаты наших исследований влияния на рост и возобновление темнохвойных насаждений с искусственным дренированием в Нижне-Омринском участковом лесничестве Троицко-Печорского лесничества (Пахучая, 2000б, 2005, 2014). В таблицах 3, 4 приведены таксационные характеристики насаждений и оценки естественного возобновления на опытных участках. Уникальность объектов, прежде всего, заключается в том, что это древостой с сибирским кедром, а также в том, что это самые восточные на европейской территории России участки с искусственным дренированием.

Возобновление кедр отмечено на 87,5% опытных участков. Абсолютная густота возобновления кедр изменяется от 0,1 до 1,8 тыс.шт./га. Сравнение густоты естественного возобновления на участках, расположенных на различном удалении от каналов, показывает, что избыточное увлажнение почвы действует на естественное возобновление кедр сибирского отрицательно. Густота естественного возобновления кедр вблизи каналов (в среднем 1,1 тыс.шт./га для пробных площадей 1, 2, 7, 8) существенно выше густоты его возобновления на середине между ними (0,1 тыс.шт./га для пробных площадей 3-6). В 75 % случаев преобладает мелкий подрост кедр (высота до 0,5 м), появившийся в основном после искусственного дренирования.

Зависимость между густотой возобновления кедр (Y, тыс.шт./га) и расстоянием до канала (X, м) может быть описана уравнением (6):

$$Y = - 0,0154 X + 1,4954 \quad (R^2 = 0,6456; R = 0,80; R_{0,05} = 0,71). \quad (6)$$

Таким образом, искусственный дренаж, так же как и естественное дренирование, положительно влияет на возобновление кедр.

Таблица 3

**Таксационная характеристика насаждений на объектах исследования в Нижне-Омринском
участковом лесничестве Троицко-Печорского лесничества**

Номер пробной площади	Элемент леса	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Состав	Относи- тельная полнота	Запас общий, м ³	Класс возраста	Класс бонитета по М.М. Орлову
1-1999	Е	9,0	9,0	I 5Кд5Б	0,43	137	X	IV
	Кд	48,0	20,0	II 10Е	0,27			
	Б	21,4	16,5					
2-1999	Е	11,6	10,0	I 10Кд	0,10	52	VIII	V
	Кд	36,0	17,8	II 5Е5Б ед.Пх	0,88			
	Б	8,7	9,0					
	Пх	4,0	4,5					
3-1999	Е	11,3	9,5	I 4Кд6Б	0,23	123	IX	V6
	Б	17,1	15,0	II 10Е ед.КдII	0,60			
	КдI	28,0	16,0					
	КдII	6,4	5,0					
4-1999	КдI	24,2	15,0	I 10КдI	0,15	84	VIII	V6
	КдII	4,0	4,0	II 8Е2Б ед.КдII	0,43			
	Е	9,2	9,0					
	Б	13,1	11,0					
5-1999	Е	12,1	11,0	I 5Кд5Б	0,25	202	IX	Va
	Кд	22,2	14,5	II 10Е	0,88			
	Б	21,4	16,5					
6-1999	Е	10,8	9,5	I 9Е1Б ед.Кд	0,99	136	IX	V6
	Кд	6,0	5,0					
	Б	9,6	9,5					
7-1999	Е	11,4	9,5	I 8Б2С	0,29	132	IX	V6
	Б	15,6	14,0	II 9Е1Кд	0,63			
	Кд	9,3	7,0					
	С	13,5	12,0					
8-1999	Е	11,5	10,0	I 10Б	0,2	240	IX	Va
	Кд	15,4	11,0	II 9Е1Кд+Пх	1,6			
	Б	15,4	14,0					
	Пх	10,1	9,0					

Примечание: 1. Е - ель; С - сосна; Б - береза; Пх - пихта; КдI - кедр первого (старшего) поколения; КдII - кедр второго (младшего) поколения; 2. Продолжительность класса возраста для кедра принята 20 лет.

Таблица 4

Характеристика естественного возобновления на опытных участках

№ п/п	Тип леса	Состав	Густота по породам, тыс.шт./га				Общая густота, тыс.шт./ га
			ель	пихта	кедр	береза	
1	Е- долгом.	7Е1Кд2Б	3,6м		0,8м	1,0к	5,4
2	Е-долгом.	5Е2Кд3Б	2,5м		0,8м	1,6к	4,9
3	Е-ос.-сф.	9Е1Кд	0,8с		0,1м		0,9
4	Е-сфагнов.	6Е1Пх2Кд1Б	0,5к	0,1м	0,1к	0,1м	0,8
5	Е- долгом.	6Е4Б	1,0к			0,7м	1,7
6	Е- долгом.	7Е1Пх1Кд1Б	1,3с	0,1м	0,1м	0,2м	1,7
7	Е- ос.-сф.	5Е4Кд1Б	1,3с		0,9м	0,3к	2,5
8	Е- долгом.	4Е1Пх4Кд1Б	2,1м	0,6с	1,8м	0,6м	5,1

Примечание: 1. Е – ель; К – кедр; Пх – пихта; Б – береза; 2. долгом. – долгомошник; ос. – сф. – осоково-сфагновый; сфагнов. – сфагновый; 3. м – мелкий подрост (высота до 0,5 м), с – средний подрост (высота от 0,51 до 1,50 м), к – крупный подрост (высота более 1,50 м).

Заключение

Насаждения с кедром сибирским в Республике Коми характеризуются высоким возрастом (до 340-480 лет), средней производительностью (III-IV класс бонитета), запасом до 350-385 м³/га. Естественное возобновление кедра отмечено на 88% пробных площадей. Это свидетельствует о непрерывности возобновительного процесса данной породы.

За границами сплошного ареала участки островного кедра отмечены от 61,76 до 66,46 градуса северной широты и от 49,75 до 62,33 градуса восточной долготы. На качественном (25%) уровне значимости совокупным влиянием широтного и меридионального положения определяется около 15 % изменчивости площади участков островного кедра. Это подтверждает представление о климатической обусловленности северной границы ареала кедра и указывает на то, что при обосновании положения западной границы ареала наряду с антропогенными факторами должен учитываться также и вклад климатической составляющей.

При формировании границ ареала существенным является вклад такого фактора, как естественный дренаж, определяемый близостью участков к водотокам и их приуроченностью к положительным элементам рельефа местности. Подтверждением этого известного положения в условиях естественного дренирования территорий является установленная достоверная связь между густотой возобновления кедра на участках с искусственным дренажем и расстоянием от этих участков до ближнего канала ($R = 0,80$; $R_{0,05} = 0,71$).

В связи с потеплением климата прогнозируется смещение северной границы лесной растительности, а значит и темнохвойного леса с кедром, на север. Однако необходимо учитывать, что наряду с климатом существенное влияние на динамические процессы на северной границе леса может оказывать антропогенное воздействие. Кроме этого, для отдельных территорий Республики Коми долговременный тренд повышения температуры (потепления климата) может иметь противоположную общепринятым представлениям направленность. В связи с этим, при общей тенденции потепления климата, в отдельных районах республики не обязательно следует ожидать смещения северной границы лесной растительности, в т.ч. островных участков кедра, в северном направлении.

Библиографический список

1. Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. – М. : Дрофа; ДиК, 1997. – 116 с.
2. Воробьев, О.Н. 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. – Том. 13. – № 4. – С. 124-134.
3. Геопортал Республики Коми (раздел «Особо охраняемые природные территории»). – Режим доступа : <https://gis.rkomi.ru>. (Дата обращения 28.08.2018).
4. Информационно-аналитическая система «Особо охраняемые природные территории России» (ИАС «ООПТ РФ»). – Режим доступа : oort.aagi.ru/oort/. (Дата обращения 28.08.2018).
5. Кадастр особо охраняемых природных территорий Республики Коми / под ред. С. В. Дёгтевой, В. И. Пономарева. – Сыктывкар, 2014. – 428 с.
6. Киселев, А.Н. Биogeография: учебное пособие / А.Н. Киселев. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2005. – 120 с.
7. Козубов, Г. М. Перспективы изучения и сохранения лесных генетических ресурсов в Республике Коми / Г.М. Козубов, С. В. Дегтева // Программа сохранения и постоянного воспроизводства лесных генетических ресурсов в Новых Независимых государствах бывшего СССР: материалы совещания 23-26 сентября 1996 г. – Беловежа, Беларусь: Арбора Публицерс, Зволлен, Словакия и Международный институт растительных генетических ресурсов, 1996. – С. 56-58.
8. Крылов, Г.В. Кедр / Г. В. Крылов, Н. К. Таланцев, Н. Ф. Козакова. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 216 с.
9. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Т.Ф. Мифтахов, С.А. Незамаев, Ю.А. Полевщикова // Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – № 3(13). – С. 17 – 24.
10. Курбанов, Э. А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин, А. В. Губаев, Ю. А. Полевщикова. – Йошкар-Ола : ПГТУ, 2015. – 131 с.
11. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Э.А. Курбанов [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132. – Режим доступа: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/> (Дата обращения 28.08.2018).
12. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов: утверждены приказом Рослесхоза №472 от 10.11.2011 [Электронный ресурс]. – 2011. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/lpo/prime/doc/71844122/> (Дата обращения 28.08.2018).
13. Непомилуева, Н.И. Кедр сибирский на северо-востоке европейской части СССР / Н. И. Непомилуева. – Л. : Наука, 1974. – 184 с.

14. Пахучая, Л. М. Изменчивость лесных фитоценозов кедрового заказника «Сусьель Локчимский» (Республика Коми) / Л. М. Пахучая // Интеграция фундаментальной науки и высшего образования по проблемам ускоренного воспроизводства, использования и модификации древесины: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2000а. – Т. I. – С.279-281.
15. Пахучая, Л. М. Рост кедров сибирского на объектах гидромелиорации в Республике Коми / Л. М. Пахучая // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Лес-2000». – Брянск, 2000б. – Т.1. – С.39-40.
16. Пахучая, Л. М. Естественное возобновление кедров сибирского на объектах гидромелиорации на Тимане в Республике Коми [Электронный ресурс] /Л. М. Пахучая // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Лес-2005». – Брянск. – Режим доступа : [http:// science-bsea.narod.ru/les_2005/pahuchaja_este-stv.htm](http://science-bsea.narod.ru/les_2005/pahuchaja_este-stv.htm). (Дата обращения 28.08.2018).
17. Пахучая, Л. М. Рост и возобновление кедров сибирского (*Pinus sibirica* du tour) на объектах гидромелиорации в Республике Коми /Л. М. Пахучая // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2014. – № 39. – С. 74-77.
18. Пахучий, В.В. Девственные древостой темнохвойной тайги на крайнем юго-востоке Республики Коми / В. В. Пахучий // География и природные ресурсы. – 1997. – №2. – С. 110 – 116.
19. Пахучий, В.В. Девственные леса северного Приуралья / В.В. Пахучий. – Санкт-Петербург: Наука, 1999. – 136 с.
20. Об утверждении Перечня лесорастительных зон РФ и Перечня лесных районов РФ: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ №83 от 21 марта 2016 (с изменениями на 21 марта 2016) [Электронный ресурс]. – 2016. Режим доступа: docs.cntd.ru/document/420224339 (Дата обращения 28.08.2018).
21. Сукачев, В. Н. Избранные труды. / В. Н. Сукачев. – Л.: Наука. – Т. 1, 1972. – 418 с.
22. Сукачев, В. Н. Избранные труды. / В. Н. Сукачев. – Л.: Наука. – Т. 3, 1975. – 539 с.
23. Термограф : архивные данные температуры воздуха и осадков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://thermograph.ru/>. (Дата обращения 28.08.2018).
24. Callaghan, T. V. The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications / T. V. Callaghan, B. R. Werkman, R. M. M. Crawford // *Ambio. Special Report*. – 2002. – № 12. – P. 6-14.
25. Vlassova, T. R. Human impact on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra / T. R. Vlassova // *Ambio. Special Report*. – 2002. – № 12. – P. 30-36.

References

1. Atlas po klimatu i gidrologii Respubliki Komi (Atlas on climate and hydrology of the Komi Republic), Moscow, 1997, 116 p.
2. Vorob'ev, O.N. Ocenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v Srednem Povol-zh'e po snimkam Landsat (Assessment of the dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Volga region from Landsat images), O.N. Vorob'yov, E.A. Kurbanov, Yu.A. Polevshchikova, S.A. Lezhnin, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, Pp. 124-134.
3. Geoportal Respubliki Komi. “Osobo ohranyaemye prirodnye territorii” (Geoportal of the Republic of Komi. “Specially Protected Natural Areas”), available at: <https://gis.rkomi.ru>, 28.08.2018.
4. Informacionno-analiticheskaya sistema “Osobo ohranyaemye prirodnye territorii Rossii” (Information-analytical system “Specially Protected Natural Territories of Russia”), available at: <http://oopt.aari.ru/oopt/>, 28.08.2018.
5. Dyogtevoj, S. V. Kadastr osobo ohranyaemykh prirodnih territorij Respubliki Komi (Cadastre of specially protected natural territories of the Komi Republic), S. V. Dyogtevoj, V. I. Ponomareva, Syktyvkar, 2014, 428 p.
6. Kiselev, A.N. Biogeografiya (Biogeography), A. N. Kiselev, Vladivostok, 2005, 120 p.
7. Kozubov, G. M. Perspektivy izucheniya i sohraneniya lesnyh geneticheskikh resursov v Respublike Komi (Prospects for the study and conservation of forest genetic resources in the Komi Republic), G. M. Kozubov, S. V. Degteva, Proc. Conf. *Programma sohraneniya i postoyannogo vos-proizvodstva lesnyh geneticheskikh resursov v Novyh Nezavisimyh gosudarstvakh byvshego SSSR*, 1996, Pp. 56-58.
8. Krylov, G.V. Kedr (Cedar), G.V. Krylov, N.K. Talancev, N.F. Kozakova. – M.: Lesn. prom-st', 1983, 216 p.
9. Kurbanov, E.A. Distancionnyj monitoring dinamiki narushenij lesnogo pokrova, lesovozobnovleniya i lesovostanovleniya v Marijskom Zavolzh'e (Remote monitoring of the dynamics of violations of forest cover, reforestation and reforestation in the Mari trans-Volga region), E.A. Kurbanov, T.V. Nureeva, O.N. Vorob'ev, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, T.F. Miftahov, S.A. Nezamaev, Yu.A. Polevshchikova, *Vestnik MarGTU*, Joshkar-Ola, 2011, Vol. 3, No. 13, Pp. 17-24.
10. Kurbanov, E. A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validaciya i ocenka tochnosti (Thematic mapping of vegetation cover using satellite images: validation and assessment of accuracy), E. A. Kurbanov, O. N. Vorob'ev, S. A. Lezhnin, A. V. Gubaev, Yu. A. Polevshchikova, Joshkar-Ola, 2015, 131 p.
11. Kurbanov, E.A. Dva desyatiletiya issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS (Two decades of vegetation research on MODIS), Proc. Conf. *Lesnye ehkossistemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distanci-onnyj monitoring*, Joshkar-Ola, 2016, No. 2, Pp. 123-132.
12. Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu gosudarstvennoj inventarizacii lesov: utverzhdeny prikazom Rosleskhoza ot 10.11.2011 No. 472 (Guidelines for the state forest inventory: approved by order of the Rosleskhodz of November 10, 2011 No. 472), 2011, available at: [https:// www.garant.ru/products/lpo/prime/doc/71844122/](https://www.garant.ru/products/lpo/prime/doc/71844122/), 28.08.2018.
13. Nepomilueva, N.I. Kedr sibirskij na severo-vostoke evropejskoj chasti SSSR (Siberian cedar in the northeast of the European part of the USSR), N. I. Nepomilueva, 1974, 184 p.
14. Pahuchaya, L. M. Izmenchivost' lesnyh fitocenozov kedrovogo zakaznika “Sus"el' Lok-chimskij” (Variability of forest phytocenoses of cedar reserve “Sousse” el Lok-Chimsky), L. M. Pahuchaya, Proc. Conf. *Integraciya funda-*

mental'noj nauki i vysshe-go obrazovaniya po problemam uskorenno go vosproizvodstva, ispol'zovaniya i modifikatsii drevessiny, Voronezh, 2000, Vol. 1, Pp. 279-281.

15. Pahuchaya, L. M. Rost kedra sibirskogo na ob"ektah gidromelioratsii v Respublike Komi (Growth of Siberian cedar on the sites of hydroamelioration in the Komi Republic), L. M. Pahuchaya, Proc. Conf. "Les-2000", Bryansk, 2000, Vol. 1, Pp. 39-40.
16. Pahuchaya, L. M. Estestvennoe vozobnovlenie kedra sibirskogo na ob"ektah gidromelioratsii na Timane v Respublike Komi (Natural renewal of the Siberian cedar on the subject of hydromelioration on Titan in the Komi Republic), L. M. Pahuchaya, Proc. Conf. "Les-2005", Bryansk, available at: http://science-bsea.narod.ru/les_2005/pahuchaja_este-stv.htm, 28.08.2018.
17. Pahuchaya, L. M. Rost i vozobnovlenie kedra sibirskogo (Pinus sibirica du tour) na ob"ektah gidromelioratsii v Respublike Komi (Growth and renewal of Siberian cedar (Pinus sibirica du tour) on both "the levels of hydroamelioration in the Komi Republic), L. M. Pahuchaya, *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, No. 39, Pp. 74-77.
18. Pahuchij, V.V. Devstvennyye drevostoi temnohojnoj tajgi na krajnem yugo-vostoke Respubliki Komi (Virgin conifer of dark coniferous taiga in the extreme southeast of the Komi Republic), V. V. Pahuchij, *Geografiya i prirodnye resursy*, 1997, No. 2, Pp. 110-116.
19. Pahuchij, V.V. Devstvennyye lesa severnogo Priural'ya (Virgin forests of the Northern Urals), V.V. Pahuchij, Sankt-Peterburg, 1999, 136 p.
20. Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nyh zon RF i Perechnya lesnyh rajonov RF: prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ehkologii RF №83 ot 21 marta 2016 (On the approval of the List of forest vegetation zones of the Russian Federation and the List of forest regions of the Russian Federation: order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 83 of March 21, 2016), available at: <http://docs.cntd.ru/document/420224339/>, 28.08.2018.
21. Sukachev, V. N. Izbrannye Trudy (Selected Works), V. N. Sukachev, L.: Nauka, 1972, Vol. 1, 418 p.
22. Sukachev, V. N. Izbrannye Trudy (Selected Works), V. N. Sukachev, L.: Nauka, 1975, Vol. 3, 539 p.
23. Termograf: arhivnye dannye temperatury vozduha i osadkov (Thermograph: archived air temperature and precipitation data), available at: <http://thermograph.ru/>, 28.08.2018.
24. Callaghan, T. V. The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications, T. V. Callaghan, B. R. Werkman, R. M. M. Crawford, *Ambio. Special Report*, 2002, No. 12, Pp. 6-14.
25. Vlassova, T. R. Human impact on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra, T. R. Vlassova // *Ambio. Special Report*, 2002, No. 12, Pp. 30-36.

УДК 634.09

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЛЕСОВ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

М.В. Мартынова, Р.Р. Султанова, А.К. Габделхаков
Башкирский государственный аграрный университет

В современных экономических условиях важной задачей является определение основных направлений эффективного развития и формирования политики в области охраны и защиты, использования и воспроизводства лесов. В основе экономической оценки лесов должен лежать максимально возможный эффект пользования при определенном уровне затрат, зависящий от условий развития лесного хозяйства в целом. Многофункциональное значение лесов вызывает необходимость использования специфических приемов экономической оценки различных природных благ. В работе приведены данные экономической оценки экологических функций лесов, таких как водоохранно-водорегулирующая, почвообразующая, почвозащитная и климаторегулирующей роли, а также выделение насаждениями фитонцидов и кислорода, ионизация воздуха. В основу исследований положена методика оценки экологических функций леса, разработанная в Российской академии наук (Уральское отделение). Выявлено, что эколого-экономическая оценка земель лесного фонда определяется совокупностью качественных и количественных характеристик, отражающих значение лесных ресурсов, социальных и средообразующих функций лесов. В ходе проведения исследований определен общий экономический эффект от экологических функций лесов, рассчитанный с учетом природно-климатических показателей (атмосферные осадки, речной сток, почвенная характеристика, рельеф, заболоченность территории, подземный сток и другие), лесоводственно-таксационных характеристик насаждения (породный состав (с выделением преобладающей древесной породы), возраст лесных насаждений, полнота, бонитет, запас и т.д.), затрат на воспроизводство 1 гектара леса, а также величины лесных такс за древесину. В результате проведенных исследований определено, что общая стоимость экологических функций лесов Республики Башкортостан составила 433,34 тыс. руб./га, из них водо-

охранно-водорегулирующая роль лесных ландшафтов – 261,8 тыс. руб./га, почвообразующая роль леса – 8,08 тыс. руб./га, почвозащитная роль леса – 150,8 тыс. руб./га, климаторегулирующая роль леса – 7,6 тыс. руб./га, ионизация воздуха – 0,25 тыс. руб./га, обогащение кислородом – 4,6 тыс. руб./га, выделение фитонцидов – 0,21 тыс. руб./га.

Ключевые слова: лесной фонд, водорегулирующая роль, экономический эффект, фитонциды, климаторегулирующая роль, почвозащитная роль, экономическая оценка.

ECONOMIC EVALUATION OF ECOLOGICAL FUNCTIONS OF FORESTS IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

M. Martynova, R. Sultanova, A. Gabdelhakov
Bashkir State Agrarian University

In the current economic situation it is crucial to determine the main directions of effective development and policy formation in the field of protection, management and regeneration of forests. Economic evaluation should be based on the maximum possible effect from the use of forests obtained at certain cost. Multifunctional forest use makes it necessary to apply specific methods of economic evaluation. The paper uses the economic evaluation data of ecological functions of forests including water protection and water regulation, soil protection and climate control, as well as phytoncides and oxygen release and air ionization. The research is based on the methodology of forest ecological function evaluation developed at the Russian Academy of Sciences (the Ural Branch). It has been determined that the ecological and economic evaluation of forest areas is determined by a set of qualitative and quantitative characteristics that reflect the value of forest resources, social and environmental functions of forests. In our research we calculated the general economic effect of the ecological functions of forests using natural and climatic parameters (precipitation, river flow, soil characteristics, topography, wetland, underground flow, etc.), forestry and inventory characteristics of plantations (species composition, predominant species, age of forest plantations, canopy density, quality class, stock, etc.), the cost of regeneration of 1 hectare of forest, as well as the value of forest taxes for wood. As a result of the research carried out, it has been determined that the total value of ecological functions of forests in the Republic of Bashkortostan amounts to 433.34 thousand rubles/ha, including water protection and water regulation – 261.8 thousand rubles/ha, soil-formation – 8.08 thousand rubles/ha, soil-protection – 150.8 thousand rubles/ha, climate-regulation – 7.6 thousand rubles/ha, air ionization – 0.25 thousand rubles/ha, oxygen enrichment – 4.6 thousand rubles/ha, phytoncide release – 0.21 thousand rubles/ha.

Key words: forest fund, water regulation, economic effect, phytoncides, climate regulation, soil protection, economic evaluation.

Введение. В современных экономических условиях важной задачей является определение основных направлений эффективного развития и формирования политики в области охраны и защиты, использования и воспроизводства лесов. Оценка потенциала ресурсов леса во многом определяет стратегический подход к их использованию (IUFRO ..., 2018). Неточность оценки значимости лесных ресурсов может привести к выбору неверной стратегии их использования (Шпак, 2014; Buongiorno, Johnston, 2018).

При экономической оценке лесов необходимо учитывать двойственность их народно-хозяйственного значения, а также экологические и социальные аспекты (Führer, 2000; Canti-ani1 et al., 2010). Во-первых, ценность лесов определяется их ролью как источника древесной и недревесной продукции, а во-вторых, их средозащитными функциями (Лебедев и др., 2003; Loboda et al., 2017). Комплексная оценка леса – это сумма эффектов от использования всех видов ресурсов и полезностей за неограниченный период пользования. В основе экономической оценки леса должен лежать максимально возможный эффект пользования при заданном уровне затрат, зависящий от условий развития лесного хозяйства в целом (Hoogstra-Klein et

al., 2017). Многофункциональное значение лесов вызывает необходимость использования специфических приемов экономической оценки различных природных благ (Макаренко, 1996; Kurbanov et al., 2007).

Анализ работ по исследуемой теме позволяет сделать вывод о том, что эколого-экономическая оценка лесных ландшафтов и социальных функций, как правило, не рассматриваются. Зачастую производится оценка только лесных ресурсов, природный потенциал лесов определяется через заданные коэффициенты. Большинство полезных функций лесов, которые сложно оценить с экономической точки зрения, напрямую зависят от комплексной продуктивности насаждений (Курбанов и др., 2008). В этой связи при решении задач повышения экологических и социальных функций леса можно применять традиционные лесоводственные методы. При этом особое значение должны иметь мероприятия, направленные на сохранность уникальных качеств ландшафта (Данилин и др., 1998)

Цель исследования – экономическая оценка средообразующих, защитных и иных полезных функций лесов.

Объектом исследования являются лесные насаждения, расположенные на землях лесного фонда Республики Башкортостан (РБ).

Методика. В основу исследований положена методика оценки экологических функций леса, разработанная в Российской академии наук (Уральское отделение) (Лебедев и др., 2002), выделение фитонцидов рассчитывалось по методике, предложенной В.Д. Пряхиной и В.Т. Николаенко (1981).

Республика Башкортостан, занимая выгодное геополитическое положение, обладает достаточной ресурсной обеспеченностью и высоким интеллектуальным потенциалом (Лесной план, 2008). Лесной фонд Республики Башкортостан составляет более 1/3 территории, что позволяет сосуществовать разнообразным сообществам. На территории республики выделено три лесорастительных района:

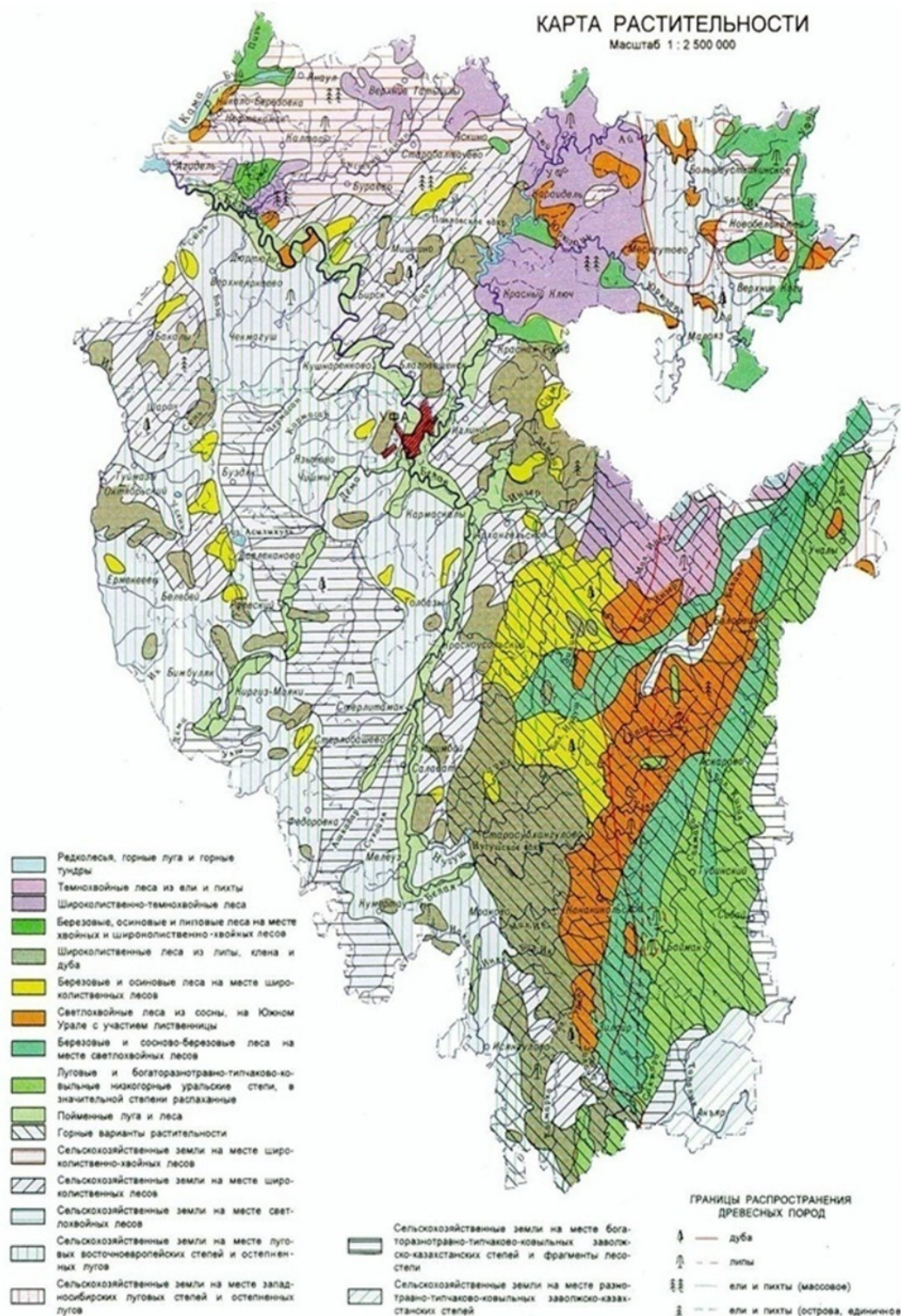
- район хвойно-широколиственных лесов европейской части Российской Федерации;
- Южно-Уральский лесостепной район;
- лесостепной район европейской части Российской Федерации.

Площадь земель лесного фонда Республики Башкортостан составляет 5,74 млн га. Лесные земли по площади составляют порядка 92,4% общей лесной площади, леса в большей степени имеют естественное происхождение. Лесистость территории колеблется в значительных пределах: от 6,2-9,1% (Стерлитамакский и Куюргазинский районы) до 81,2-92,0% (Белорецкий район). Леса по целевому назначению разделены на защитные и эксплуатационные. Резервные леса не выделены.

Свыше 75 % площади представлены горными лесами, выполняющими почвозащитные, водорегулирующие и водоохранные функции (см. рисунок).

Как следствие горизонтальной зональности и вертикальной поясности породный состав лесов представлен хвойными, твердолиственными, мягколиственными и смешанными лесами. Разнообразие типов лесорастительных условий, богатый ассортимент древесно-кустарниковых пород формируют сложные по составу насаждения. Естественные лесные сообщества РБ представлены 20 древесными породами, большая часть из которых является ценными как в хозяйственном, так и в экологическом отношении (Лесной план..., 2008). Основными лесообразователями являются береза, липа, сосна, осина, ель и дуб. При этом ежегодно наблюдается смена хвойных пород на лиственные. В составе насаждений преобладают спелые и перестойные древостои, на их долю приходится порядка 46%.

Использование всех полезных функций лесов – одна из основных задач лесохозяйственного производства. Согласно Лесному кодексу Российской Федерации выделяют 16 видов использования лесов. Основными источниками доходов от использования лесов является



Карта растительности Республики Башкортостан (Лесной план, 2008)

плата за их использование. Наибольшая часть поступлений приходится на доходы от использования лесов для заготовки древесины.

В соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» правовые основы политики государства в области охраны окружающей среды должны обеспечивать сохранение благоприятной окружающей среды, биоразнообразие природных ресурсов для удовлетворения потребностей населения, а также укреплять правопорядок в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности. Экономическая же оценка экологических функций лесов включает:

- оценку водорегулирующей роли лесопокрытых участков;
- оценку почвообразующей роли леса;
- оценку почвозащитной роли леса;
- оценку климаторегулирующей роли леса;
- выделение фитонцидов;
- ионизацию воздуха;
- выделение кислорода.

В качестве характеристики водорегулирующей роли лесов обычно используется среднегодовой прирост подземного (грунтового) стока, который зависит от различных параметров расходной части водного баланса. При расчете водорегулирующей роли лесов необходимо учитывать ряд показателей:

- 1) атмосферные осадки;
- 2) речной сток;
- 3) рельеф и заболоченность территории;
- 4) породный состав;
- 5) возраст лесонасаждения, полнота, бонитет;
- 6) характеристика грунтов.

Стоимость водоохранно-водорегулирующей роли лесных ландшафтов определяется по величине среднегодового прироста подземного стока ΔS как разница между фактическим стоком на лесопокрытом водосборе и теоретическим подземным стоком на безлесной территории с учетом коэффициента заболоченности (Неклюдов, Ануфриев, 2014; Лебедев и др., 2003). При расчете стоимости водоохранно-водорегулирующей роли леса использовались следующие показатели:

- суммарная величина осадков (для РБ) – 550 мм;
- коэффициент речного стока – 0,14;
- коэффициент прироста осадков благодаря лесам – 0,10;
- коэффициент подземного стока: с учетом процента лесистости – для хвойных 0,55; для лиственных 0,50;
- коэффициент заболоченности территории – 0,003.

Суммарный экономический эффект водоохранно-водорегулирующей роли леса составил:

- для хвойных насаждений – 174,5 тыс.руб./га;
- для лиственных насаждений – 87,2 тыс.руб./га.

При расчете стоимости *почвообразующей роли леса* использовались следующие показатели:

- запас древесины на 1 га в спелом модальном насаждении, данный показатель был принят равным 250 м³/га;
- средневзвешенная величина лесных такс за древесину – 32,3 руб./м³;
- коэффициент, характеризующий снижение запаса древесины при оценке почвообразующей роли леса, – 1,29;
- коэффициент, характеризующий снижение товарной ценности древесины при оценке почвообразующей роли леса, – 1,31.

Суммарная стоимость почвообразующей роли леса составила 8,08 тыс. руб./га.

Стоимость климаторегулирующей роли определена за период одного оборота рубки с учетом:

- затрат на мероприятия по воспроизводству 1 га леса – 5756 руб./га;
- коэффициент, учитывающий затраты на охрану и защиту лесов, – 0,5;
- норматив рентабельности в лесном хозяйстве – 0,2;
- доля затрат лесного хозяйства, отнесенная на климаторегулирующую роль леса, – 0,5;

- коэффициент, дифференцирующий значения климаторегулирующей роли леса в зависимости от характеристик, – 1;

- коэффициент дисконтирования, количество мероприятий при воспроизводстве лесов.

Суммарная стоимость климаторегулирующей роли леса составила 7,6 тыс. руб./га.

Стоимость почвозащитной роли леса была рассчитана с учетом:

- цены почвообразующей роли леса – 8,08 тыс. руб./га;
- сумма стоимостей средоформирующих функций леса – 263,3 тыс. руб./га;
- коэффициент, дифференцирующий значение почвозащитной роли леса – 0,53.

Суммарная стоимость почвозащитной роли леса составила 150,8 тыс. руб./га.

Выделение фитонцидов. Древесные виды выделяют фитонциды, которые убивают болезнетворных бактерий. Выявлено, что 1 га лиственного леса выделяет в сутки 2 кг летучих органических веществ, а хвойного – 5 (Степень, Соболева, 2016).

На основе рассчитанной стоимости фитонцидов, которые были получены искусственным путем с помощью установки «Арефит» (30 руб./кг) была рассчитана стоимость фитонцидов, которая выделяется с 1 га леса на протяжении сезона, – 0,21 тыс. руб./га.

Ионизация воздуха лесом устанавливается установкой «Рязань». Стоимость ионизации воздуха составляет 250 руб. на 1 га/год. Стоимость ионизации воздуха составила 0,25 тыс. руб./га (Болдакова и др., 2002).

Выделение кислорода. Стоимость 1 т получаемого промышленным путем кислорода составляет 230 руб. (Спицин и др., 2003). Стоимость выделения кислорода составила 4,6 тыс. руб./га.

Общие рассчитанные данные экономической оценки средообразующих, водоохраных, защитных, санитарно-гигиенических и иных полезных функций лесов Республики Башкортостан представлены в таблице.

Экономическая оценка экологических функций лесов Республики Башкортостан

№ пп	Наименование вида полезных функций лесов	Единица измерения	Оценка экологических функций лесов
1	Водоохранно-водорегулирующая роль лесных	тыс. руб./га	261,8
2	Почвообразующая роль леса	тыс. руб./га	8,08
3	Почвозащитная роль леса	тыс. руб./га	150,8
4	Климаторегулирующая роль леса	тыс. руб./га	7,6
5	Ионизация воздуха	тыс. руб./га	0,25
6	Обогащение кислородом	тыс. руб./га	4,6
7	Выделение фитонцидов	тыс. руб./га	0,21
Итого		тыс. руб./га	433,34

В результате проведенных исследований было выявлено, что общая стоимость выполняемых лесом экологических функций в Республики Башкортостан составила 433,34 тыс. руб./га, из них водоохранно-водорегулирующая роль лесных ландшафтов – 261,8 тыс. руб./га, почвообразующая роль леса – 8,08 тыс. руб./га, почвозащитная роль леса – 150,8 тыс. руб./га, климаторегулирующая роль леса – 7,6 тыс. руб./га, ионизация воздуха – 0,25 тыс. руб./га, обогащение кислородом – 4,6 тыс. руб./га, выделение фитонцидов – 0,21 тыс. руб./га.

Полученные высокие стоимостные показатели экологических функций лесов обусловлены:

- высоким процентом лесистости территории (более 39%), при этом в горно-лесной зоне данный показатель достигает 81,2-92,0% (Белорецкий район);

- разнообразием древесных пород (естественные лесные сообщества представлены 20 древесными породами), основными лесообразующими породами являются береза, липа, сосна, осина, ель и дуб;
- оптимальной возрастной структурой насаждений;
- высокой продуктивностью насаждений;
- благоприятными природно-климатическими условиями;
- богатством почв;
- низким коэффициентом заболоченности территории и др.

Проведенный анализ позволяет заключить, что роль экологического фактора определяется не только климатическими условиями, но и напрямую зависит от состояния лесных экосистем, а именно: от целевого назначения и категории защитных лесов, породного состава насаждений, возрастной структуры древостоя, процента лесистости территории. Экологический аспект напрямую определяется условиями использования лесов, так например, при определении почвообразующей роли леса учитывается плата за древесину на корню, при оценке климаторегулирующей роли – стоимость воспроизводства лесов.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что леса Республики Башкортостан имеют высокие технические характеристики, но при этом следует оценивать не столько их сырьевое значение, сколько выполняемые средообразующие и средозащитные функции. Экономическая оценка экологических функций лесов будет стимулировать устойчивое развитие лесопользования в регионе, нивелировать условия лесозаготовительного производства, изъятие лесного дохода, который может быть направлен не только на лесовосстановление, охрану и защиту лесов, но и на реализацию экологических проектов. Полученная информация может использоваться при комплексной оценке стоимости лесов республики, которая, в свою очередь, необходима для эффективности использования имеющихся лесных ресурсов.

Библиографический список

1. Болдакова, В. А. Эколого-экономическая оценка природного объекта / В.А. Болдакова, Д.О. Фомин, Р.Г. Хлебопрос // Инженерная экология. – 2002. – № 6. – С. 54-55.
2. Данилин, В. Н. Комплексная экономическая оценка хозяйственных и социально-экологических функций леса / В.Н. Данилин, Е.Ф. Млочанов, В.П.Коба // Лесной вестник. –1998. – №5. – С. 53-57.
3. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – №3. – С. 5-17.
4. Лебедев, Ю.В. Учет фактора времени при оценке долговременного эффекта средоформирующих функций леса / Ю.В. Лебедев, Ю.Ю. Копылова, И.М. Потравный // Экономика природопользования. – 2003. – № 1. – С. 32-44.
5. Лесной план Республики Башкортостан. – Уфа: НИИ Леса, 2008. –347 с.
6. Макаренко, Г.П. Эколого-экономическая оценка водоохранной роли леса /Г.П. Макаренко// Формирование лесного кадастра и системы плат. – Екатеринбург, 1996. – С. 17-21.
7. Неклюдов, И.А.Эколого-экономическая оценкаimoreгулирующей роли лесопокрываемых водосборов Среднего Урала /И.А. Неклюдов, В.П. Ануфриев // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014. – Т.3. – С. 355-363.
8. Пряхин, В.Д. Пригородные леса / В.Д. Пряхин, В.Т. Николаенко. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. –248 с.
9. Спицин, П.К. Контроль кислорода и азота на анализаторах «Метавак-АК» и «Метавак-К» /П.К. Спицын, А.Н.Рылов, О.В. Михеева // Аналитика и контроль – 2003. – № 1. – С. 83-88.
10. Степень, Р.А.Оздоровление городской атмосферы летучими выделениями леса /Р.А. Степень, С.В.Соболева // Хвойные бореальной зоны – 2016. – № 1-2. – С. 76-79.
11. Об охране окружающей среды: федеральный закон № 7-ФЗ от 10.01.2002 (ред. от 31 декабря 2017 года).
12. Лесной кодекс Российской Федерации: федеральный закон №200-ФЗ от 04.12.2006 (ред. от 29.12.2017).
13. Шпак, Н.А.Методологические аспекты экономической оценки лесных ресурсов /Н.А. Шпак// Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 3. – С. 93-96.
14. Buongiorno, J. Effects of parameter and data uncertainty on long-term projections in a model of the global forest sector /J. Buongiorno, C. Johnston // Forest Policy and Economics. – 2018. –Vol. 93. – P. 10-17.
15. Cantiani1, P. Forest functions evaluation to support forest landscape management planning/ P. Cantiani1, I. DeMeo, F. Ferretti, A. Paletto // Forestry ideas. – 2010. –№ 1(39). – P. 44-51.
16. Führer, E. Forest functions, ecosystem stability and management /E. Führer// Forest Ecology and Management – 2000. – № 132. – P. 29-38.

17. Hoogstra-Klein, M.A. Analysing scenario approaches for forest management — One decade of experiences in Europe / M.A. Hoogstra-Klein, G.M. Hengeveld, R. deJong // *Forest Policy and Economics*. — 2017. — Vol. 85 (2) — P. 222-234
18. IUFRO 2015-2019 STRATEGY. Interconnecting forests, science and people. — 18 p. — Available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/
19. Kurbanov E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity / E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin // *Scandinavian Journal of Forest Research*. — 2007. — № 22. — P. 488-499.
20. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda. O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991* / Eds. G. Gutman, R. Volker // Springer International Publishing. — 2017. — P. 173-192.

References

1. Boldakova, V. A. Ekologo-ehkonomicheskaya ocenka prirodnogo ob"ekta (Ecological and economic assessment of a natural object), V.A. Boldakova, D.O. Fomin, R.G. Hlebopros, *Inzhenernaya ehkologiya*, 2002, No. 6, Pp. 54-55.
2. Danilin, V. N. Kompleksnaya ehkonomicheskaya ocenka hozyajstvennyh i social'no-ehkologicheskikh funkciy lesa (Comprehensive economic assessment of economic and socio-ecological functions of forests), V.N. Danilin, E.F. Mlochanov, V.P.Koba, *Lesnoj Vestnik*, 1998, No. 5, Pp. 53-57.
3. Kurbanov, E.A. K voprosu ob uglerododeponiruyushchih nasazhdeniyah (On the issue of carbon deposition), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'yov, L.S. Moshkina, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, S.A. Nezamaev, *Vestnik MarGTU*, Joshkar-Ola, 2008, No. 3, Pp. 5-17.
4. Lebedev, Yu.V. Uchet faktora vremeni pri ocenke dolgovremennogo ehffekta sredoformiruyushchih funkciy lesa (Consideration of the time factor in assessing the long-term effect of forest environment-forming functions), Yu.V. Lebedev, Yu.Yu. Kopylova, I.M. Potravnyj, *Ekonomika prirodopol'zovaniya*, 2003, No. 1, Pp. 32-44.
5. Lesnoj plan Respubliki Bashkortostan (Forest Plan of the Republic of Bashkortostan), Ufa, 2008, 347 p.
6. Makarenko, G.P. Ekologo-ehkonomicheskaya ocenka vodo-ohrannoj roli lesa (Ecological and economic assessment of the water conservation role of forests), G.P. Makarenko, *Formirovanie lesnogo kadastra i sistemy plat*, Ekaterinburg, 1996, Pp. 17-21.
7. Neklyudov, I.A. Ekologo-ehkonomicheskaya ocenka vodoreguliruyushchej roli lesopokrytyh vodosborov Srednego Urala (Ecological and economic assessment of the water regulating role of forest-covered catchments of the Middle Urals), I.A. Neklyudov, V.P. Anufriev, *Interehkspo Geo-Sibir'*, 2014, Vol. 3, Pp. 355-363.
8. Pryahin, V.D. Prigorodnye lesa (Suburban forests), V.D. Pryahin, V.T. Nikolaenko, *Lesnaya prom-st'*, Moscow, 1981, 248 p.
9. Spicin, P.K. Kontrol' kisloroda i azota na analizatorah "Metavak-AK" i "Metavak-K" (Control of oxygen and nitrogen on analyzers "Metavak-AK" and "Metavak-K"), P.K. Spicyn, A.N.Rylov, O.V. Miheeva, *Analitika i kontrol'*, 2003, No. 1, Pp. 83-88.
10. Stepen', R.A. Ozdorovlenie gorodskoj atmosfery letuchimi vydeleniyami lesa (Improvement of the urban atmosphere with volatile forest secretions), R.A. Stepen', S.V. Soboleva, *Hvojnye boreal'noj zony*, 2016, No. 1-2, Pp. 76-79.
11. Ob ohrane okruzhayushchej sredy: federal'nyj zakon № 7-FZ ot 10.01.2002 (red. ot 31 dekabrya 2017 goda) (On Environmental Protection: Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2002 (as amended on December 31, 2017)).
12. Lesnoj kodeks Rossijskoj Federacii: federal'nyj zakon №200-FZ ot 04.12.2006 (red. ot 29.12.2017) (The Forest Code of the Russian Federation: Federal Law No. 200-FZ of December 4, 2006 (as amended on December 29, 2017)).
13. Shak, N.A. Metodologicheskie aspekty ehkonomicheskoy ocenki lesnyh resursov (Methodological aspects of the economic assessment of forest resources), N.A. Shpak, *Agrarnyj vestnik Urala*, 2014, No. 3, Pp. 93-96.
14. Buongiorno, J. Effects of parameter and data uncertainty on long-term projections in a model of the global forest sector, J. Buongiorno, C. Johnston, *Forest Policy and Economics*, 2018, Vol. 93, Pp. 10-17.
15. Cantiani1, P. Forest functions evaluation to support forest landscape management planning, P. Cantiani1, I. DeMeo, F. Ferretti, A. Paletto, *Forestry ideas*, 2010, Vol. 1, No. 39, Pp. 44-51.
16. Führer, E. Forest functions, ecosystem stability and management, E. Führer, *Forest Ecology and Management*, 2000, No. 132, Pp. 29-38.
17. Hoogstra-Klein, M.A. Analysing scenario approaches for forest management — One decade of experiences in Europe, M.A. Hoogstra-Klein, G.M. Hengeveld, R. DeJong, *Forest Policy and Economics*, 2017, Vol. 85, No. 2, Pp. 222-234.
18. IUFRO 2015-2019 STRATEGY. Interconnecting forests, science and people, available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/
19. Kurbanov E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity, E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, No. 22, Pp. 488-499.
20. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, T. Loboda. O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, *"Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991"*, 2017, Pp. 173-192.

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДЫ

З.З. Рахматуллин¹, И.Р. Рахматуллина², А.К. Габделхаков¹¹Башкирский государственный аграрный университет²Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

Картографический метод исследования в условиях большого объема данных о состоянии природных объектов и значительного усложнения теоретических проблем, требующих пространственного решения, приобретает все большее значение. Картографирование природных систем позволяет провести всесторонний, системный анализ и синтез упорядоченных в пространстве и времени данных о населении, экономике, социальной сфере, природно-климатических, экологических и других разнообразных факторах. Многие экологические неблагоприятные факторы возможно предсказать или предотвратить, используя тематические карты природы (климатические, гидрологические, геологические, геоморфологические, геоботанические, почвенные и др.). При этом значительно упрощается и повышается точность расчетов гидрографических и гидрологических характеристик рек и их бассейнов, повышается качество картометрических работ по расчету координат, линейных и площадных параметров водных объектов и их бассейнов (длина, извилистость водотока, площадь водоема, водосбора и его центра тяжести). В последние годы на содействие изучению и решению экологических проблем также ориентируется геоморфологическое картографирование. К ним относится изучение одного из главных показателей экологической обстановки, факторов активизации опасных процессов (гравитационных процессов на склонах, наводнения) – рельефообразующих процессов.

При оценке современного состояния растительного покрова и параметров его биоразнообразия, а также при выявлении закономерностей его пространственно-временной организации в условиях разной степени антропогенного воздействия в мировой практике широко используется информация дистанционных изображений о структуре и свойствах растительности. Различные генетические типы почв, их гранулометрический состав, состояния и тенденции изменений (выделение смытых и намывных почв), материнские (почвообразующие) породы традиционно отображают почвенные карты. В рамках экологизации почвенное картографирование трансформируется в мониторинг земельных ресурсов, в задачи которого входит отслеживание изменений. В аспекте устойчивого развития социо-эколого-экономических систем такие карты позволяют оценивать экологические факторы и антропогенное воздействие на природные системы.

Ключевые слова: тематическое картографирование, климатические, гидрологические, геоморфологические, ландшафтные карты, водосборный бассейн, цифровая модель рельефа.

CARTOGRAPHIC METHODS OF NATURE OBJECTS RESEARCHES

Z.Z.Rakhmatullin¹, I.R.Rakhmatullina², A.K. Gabdelkhakov¹¹Bashkir State Agrarian University²Bashkir State Pedagogical University named after M.Akmulla

The cartographic research method in the conditions of a large amount of data related to natural objects and considerable complication of theoretical problems requiring spatial solution is becoming increasingly important. Mapping of natural systems allows for a comprehensive, systematic analysis and synthesis of data on population, economy, social sphere, climatic, environmental and other factors allocated in the spatial and temporal context. Many environmentally adverse factors can be predicted or prevented using thematic mapping: climatic, hydrological, geological, geomorphological, geobotanical, soil, etc. The calculations of hydrographic and hydrological characteris-

tics of rivers and their basins have herewith been significantly simplified and become more accurate; cartometric work on the calculation of coordinates, linear and area parameters of water bodies and their basins has been improved (length, tortuosity of watercourse, water area, catchment area and center of gravity). In recent years, geomorphological mapping facilitates addressing and solving environmental problems. These include examination of one of the main indicators of the environmental situation, activation factors of hazardous processes (gravitational processes on slopes, floods) - relief-forming processes.

In order to evaluate the vegetation cover and its biodiversity parameters, to identify its spatial-temporal organization patterns affected by different degree of anthropogenic impact, researchers use remote sensing data characterizing structure and properties of vegetation. Different genetic types of soil, their granulometric composition, conditions and tendencies of changes (identifying washed-off and drift soils), the source soil-forming rock are traditionally displayed on soil maps. As a part of the ecologization, soil mapping transforms into land resource monitoring aimed at tracking changes. In order to ensure sustainable development of socio-ecological-economic systems, such maps make it possible to evaluate the environmental factors and anthropogenic impact on the natural systems.

Key words: *thematic mapping, climatic, hydrological, geomorphological, landscape maps, drainage basin, digital elevation model.*

Введение. Картографический метод исследования в условиях большого объема данных о состоянии природных объектов и значительного усложнения теоретических проблем, требующих пространственного решения, приобретает все большее значение. Картографирование природных систем позволяет провести всесторонний, системный анализ и синтез упорядоченных в пространстве и времени данных о населении, экономике, социальной сфере, природно-климатических, экологических и других разнообразных факторах (Курбанов и др., 2018). При этом они опираются на достижения общей картографии, ГИС-технологий, дистанционного зондирования, математико-картографического моделирования и особенно – на достижения системного тематического картографирования (Курбанов и др., 2015; Воробьев и др., 2016, Loboda et al., 2017).

В то же время возникновение многих экологически неблагоприятных факторов возможно предсказать или предотвратить, используя тематические карты природы (климатические, гидрологические, геологические, геоморфологические, геоботанические, почвенные и др.).

Цели и задачи. Проанализировать существующие виды тематического картографирования объектов природы – климатические, гидрологические, геологические, растительные, почвенные и природопользования; выделить основные направления, выявить достижения в данной области картографирования.

Результаты исследования. Климатические вопросы давно стоят на повестке дня не только нашей страны, но и человечества в целом, что подтверждено Парижским соглашением по климату (<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>). В данном аспекте методы климатического анализа могут быть реализованы с использованием климатических карт, на которых показывается распределение показателей, характеризующих климат в пространстве, а также их изменчивость, периодичность повторений и взаимосвязи компонентов (Курбанов, 2016). Преимуществом климатических карт является то, что они составляются по данным систематических многолетних наблюдений и их статистической обработки. Как правило, климатические показатели показываются цветом, для характеристики явлений с положительными температурами используются тёплые цвета, для отрицательных температур – холодные.

В последние годы в открытом доступе в сети Интернет появилось множество сайтов с метеорологическими измерениями и климатическими данными, доступные для скачивания и с

успехом используемые в картографировании (Воробьев, Курбанов, 2017). Среди них климатическая база данных WorldClim – набор из 19 производных биоклиматических характеристик BioClim и глобальных климатических данных, включающих минимальную, максимальную и среднюю температуру, осадки, высоту над уровнем моря (рис.1), а также данные о климате прошлого и будущего.

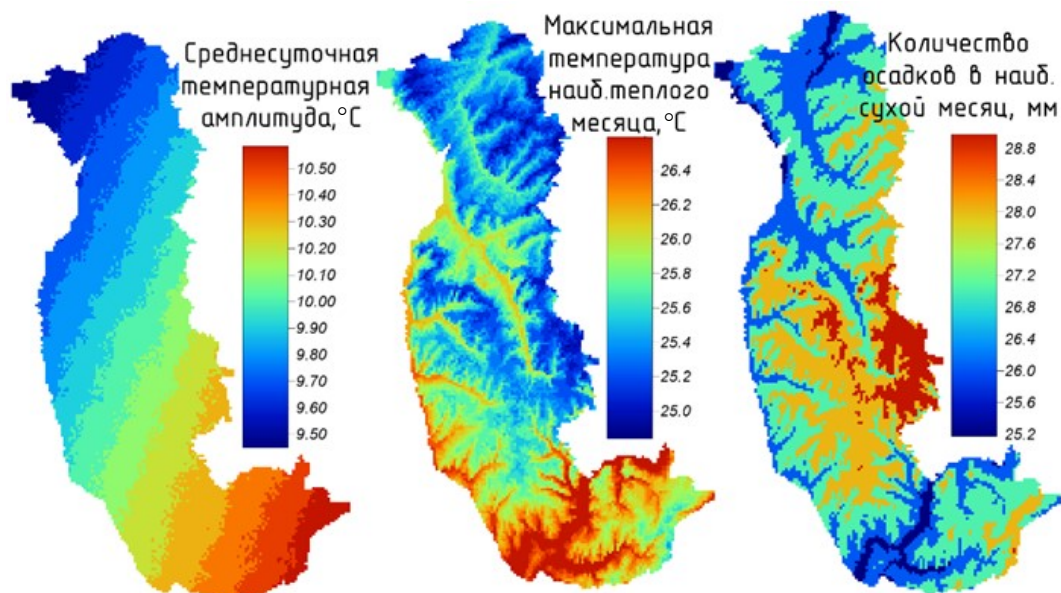


Рис. 1. Картосхемы производных климатических показателей WorldClim на территорию Бугульминско-Белебеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан

Данные покрывают всю поверхность суши (за исключением Антарктиды) и доступны для получения в разных форматах и с различным пространственным разрешением (WorldClim, 2018). National Centers for Environmental Information – обеспечивает открытый доступ к одному из наиболее важных архивов данных об окружающей среде на Земле (<https://www.ncei.noaa.gov/>). European Climate Assessment&Dataset содержит набор по таким показателям, как средняя скорость, максимальные порывы, направление ветра по станциям Европы и Средиземноморья, как максимальная, минимальная, средняя температура, осадки, давление, облачность, влажность, глубина снега, длительность светового дня, (<http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>). По Российской Федерации данную информацию обеспечивает Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации, предметом деятельности которого являются научные исследования и разработки, научно-технические работы в области создания и внедрения информационных технологий сбора, контроля, обработки и хранения гидрометеорологической информации; создание методов и технологий ведения Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении; выполнение работ и оказание услуг в области гидрометеорологии и смежных с ней областях; выработка предложений для государственных стратегий, прогнозов и программ развития; исследования изменений климата на основе высококачественных массивов гидрометеорологической информации и использования эмпирико-статистических методов анализа данных; исследования по экономической метеорологии (<http://meteo.ru/data>).

Эволюция климатического картографирования происходит в направлении отображения метеорологических факторов экологической обстановки, развиваемом на основе методов математического моделирования рассеивающей способности и потенциала загрязнения атмосферы. Путём интерполяции комплексного показателя, учитывающего климатические особенности территории (разработан в ГГО им. А.И. Воейкова под руководством Э.Ю. Безуглой) по метеостанциям с последующим вычерчиванием изолиний производится картографирование климатического потенциала загрязнения атмосферы. Обычно выполняется в виде

мелкомасштабных карт, что позволяет дать рекомендации по предупреждению загрязнений с учетом выявления влияния крупных форм рельефа и циркуляционных особенностей атмосферного воздуха глобального и регионального масштаба.

Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы создается в виде карт в среднем и крупном масштабе, что позволяет количественно охарактеризовать различия в уровнях загрязнения при одном и том же выбросе в зависимости от места размещения источника (например, на водоразделе или в долине реки), используются параметры, определяемые на значительно большем числе метеостанций с применением формулы, предложенной Т.Г. Селегей (Стурман, Семакина, 2014).

На основе данных инвентаризации и статистической отчетности проводится картографирование загрязнения атмосферы. При показе на картах планового положения источников выбросов атрибутам присваивается различная информация в зависимости от масштаба: в крупном масштабе – режим работы источника, удельные выбросы отдельных ингредиентов; в средних и мелких масштабах – суммарные выбросы от городов и их структура. Для картографирования уровней загрязнения применяется способ количественного фона, в котором цветовая гамма закрашки подбирается либо по принципу усиления интенсивности цвета, либо по принципу «светофора»: переход от зелёных через жёлтые к красным цветам по мере изменения градации в соответствии с оценочной шкалой загрязнения.

Усредненные пространственные распределения с большой детальностью наиболее распространённых загрязняющих веществ с развитием методов дистанционного зондирования стало возможным показать с помощью изолинейных карт. Например, Гейдельбергским университетом (Германия) на основе использования сканирующего абсорбционного спектрометра, установленного на искусственном спутнике Земли Европейского космического агентства ENVISAT, создана мировая спутниковая карта загрязнения атмосферы оксидами азота (earthhabitat.wordpress.com/2010/02/23/air-pollution-hotspots-world-map/), Агентством National Aeronautics and Space Administration – NASA (США) разработана спутниковая карта загрязнения атмосферы взвешенными частицами PM_{2.5} (<https://www.treehugger.com/clean-technology/new-map-shows-air-pollution-throughout-the-world.html>).

Гидрологические карты, к которым относятся наиболее часто используемые на практике карты речной сети, карты слоя (модуля) стока за различные периоды времени, карты сроков начала и средней продолжительности ледостава, карты сроков начала ледохода и средней из наибольших толщин льда, карты мутности воды рек, карты среднегодового стока взвешенных наносов рек, карты химического состава природных вод, карты ионного стока и другие отражают распределение вод на земной поверхности.

Гидрологическое картографирование соответственно приобрело нацеленность на отображение состояния водных ресурсов, в т. ч. в аспектах их истощения и загрязнения. Экологическое состояние водоемов складывается в результате взаимодействия факторов самоочищения и техногенной нагрузки. Условные линейные знаки для рек и ареалы для водоемов (с использованием на цветных картах «принципа светофора», на черно-белых – используются штриховка, густота которой увеличивается по мере ухудшения условий) применяют для изображения на картах характеристик самоочищения.

Карты разных масштабов используются в методиках картографирования загрязнения поверхностных вод. На мелкомасштабных картах классы качества воды характеризуются линейными знаками (для рек) и ареалами (для озер и водохранилищ), уровни и состав загрязнения, объемы и состав сбросов – структурными знаками, техногенная нагрузка на речные бассейны – картограммами. При более детальном картографировании линейные знаки, характеризующие качество воды, дифференцируются по веществам. Данные целесообразно дополнять расчетными характеристиками диффузного загрязнения с использованием коэффициен-

та разбавления при средне- и крупномасштабных исследованиях. В этом случае картографируемая территория подразделяется на водосборные бассейны, в пределах которых определяют все действующие источники загрязнения поверхностных вод и потенциально опасные объекты (Стурман, 2003).

Водосборный бассейн в практике картографирования выступает в качестве одной из основных операционных территориальных единиц. Наиболее перспективно решать проблемы организации, рационализации, оптимизации, районирования, моделирования, картографирования природопользования и управления его процессами, а водосборный бассейн рассматривать в качестве основной единицы для расчетов балансов и моделирования перераспределения загрязняющих веществ, самоочищения природных сред, миграции токсических элементов с использованием водосборного бассейна – особой природной геосистемы, обладающей целостностью с позиции гидрологии, геоморфологии, биогеоценологии, геохимии ландшафта и т.д., при этом границы бассейнов (водоразделы) могут четко и объективно выделяться на местности и карте, в рамках бассейновой концепции.

Все большую популярность с развитием методов дистанционного зондирования и геоинформационных технологий приобретает геоинформационное моделирование водосборных бассейнов на основе цифровой модели рельефа. Гидрографическая производная цифровой модели рельефа – модель стока составляет основу моделирования водосборных бассейнов (рис. 2). Оставаясь объектом активной дискуссии в научном сообществе, за счет таких элементарных характеристик, как водосборные бассейны, сеть водотоков, направление и аккумуляция стока формируется модель стока. В настоящее время разработано большое количество различающихся по сложности и сферам применения алгоритмов расчета направлений стока (Кошель, Этин, 2016).

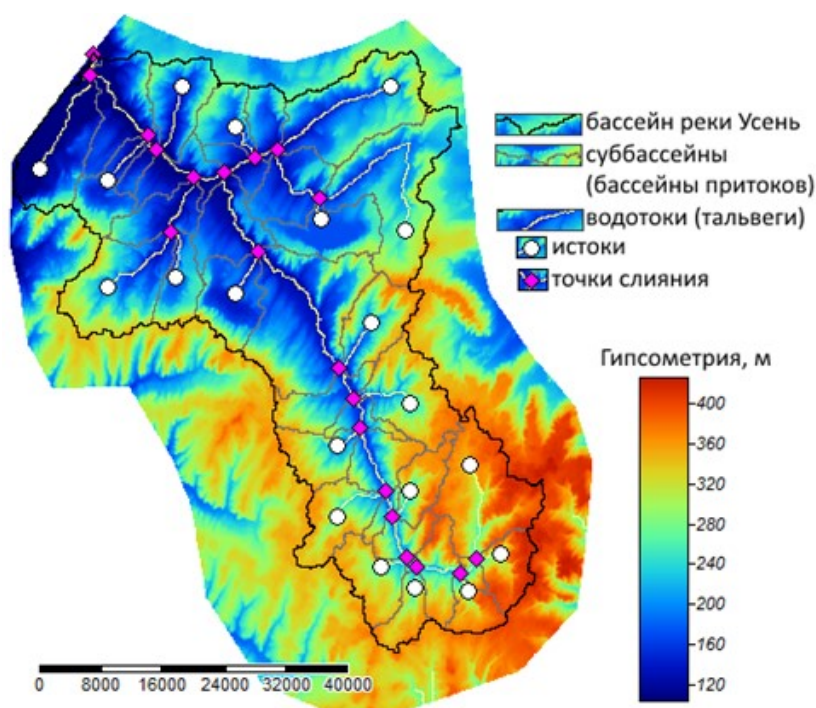


Рис.2. Водосборный бассейн реки Усень, построенный на основе цифровой модели рельефа SRTM (Рахматуллина и др., 2017)

Значительно упрощает и повышает точность расчетов гидрографических и гидрологических характеристик рек и их бассейнов, позволяет проводить картометрические работы по расчету координат, линейных и площадных параметров водных объектов и их бассейнов (длина, извилистость водотока, площадь водоема, водосбора и его центра тяжести) внедрение геоинформационных технологий, использование цифровых картографических материа-

лов и цифровых моделей рельефа. Для вычисления параметров водных объектов и их бассейнов по отношению к другим водным объектам и их бассейнам на основе оверлейных операций и картографической алгебры (коэффициенты лесистости, озерности, заболоченности, карста, распаханности, в том числе дополнительных характеристик, таких как показатели горизонтальной и вертикальной расчлененности, порядки рек, густота речной сети и других) применяется цифровое картографическое моделирование (Калинин, Пьянков, 2013).

Такие показатели, как возраст, состав, характер залегания горных пород, полезные ископаемые отображаются на геологических картах. Все эти данные для конкретной территории отражаются на нескольких картах. Основная геологическая карта – это геологостратиграфическая карта коренных пород, на которой отражаются характеристики горных пород по происхождению, возрасту и составу. Возрастное расчленение выделяется цветом в установленной шкале (системы, отделы, ярусы, свиты). Деформация геологической среды вызывается различными видами техногенной деятельности. Каждый вид техногенного воздействия и его последствия могут быть отражены на картах. В рамках экологизации геологического картографирования повышенное внимание уделяется показу на картах техногенно образованных, техногенно переотложенных и техногенно измененных пород, а также сущности физических и химических изменений в них. Способом ареалов или (при повсеместном распространении и территориально-дифференцированном характере) способом качественного фона обычно изображаются техногенные отложения, а способом изолиний передается количественная характеристика изменений пород (Стурман, 2003).

В последние годы на содействие изучению и решению экологических проблем ориентируется также и геоморфологическое картографирование. Сюда относятся изучение одного из главных показателей экологической обстановки, факторов активизации опасных процессов (гравитационных процессов на склонах, наводнения) - рельефообразующих процессов, разработка критериев оценок при эколого-геоморфологическом картографировании на разных иерархических уровнях, методы и принципы составления карт этой тематики и построения легенд (Асоян, 2009).

Ввиду того, что рельеф хорошо воспринимается зрительно и описывается математическими моделями, сформировалось целое научное направление – геоморфометрия (*geomorphometry, digital terrain analysis*), занимающееся цифровым анализом рельефа методами дифференциальной геометрии. Обычно измеряют абсолютную и относительную высоту отдельных форм рельефа, углы наклона, экспозицию склона, выпуклость и вогнутость поверхности, площади, занятые положительными и отрицательными формами рельефа.

Способы изолиний и значков традиционно применяются на топографических картах для изображения рельефа. Однако на геоморфологических картах для изображения форм рельефа применяют способы качественного фона и ареалов.

В интересах биоэкологического и геоэкологического направлений экологии рассматриваются карты растительности. Во втором случае важна информация о загрязнении и нарушении растительности, а также о потенциальной устойчивости фитоценозов. Современная геоботаническая карта – это сложное произведение, интегрирующее все свойства растительности и отражающее ее флористический состав, фитоценотический статус, динамическое состояние, экологические и географические связи.

Для исследования структуры растительного покрова на разных уровнях его организации карта является замечательным инструментом. Карты крупного масштаба составляются и анализируются для детального изучения структуры на топологическом или локальном уровне. На региональном уровне таким задачам служат среднемасштабные карты (рис.3). Примечательна роль мелкомасштабных карт и мелкомасштабных обзорных в анализе структуры растительного покрова обширных территорий: мира, континентов, субконтинентов, отдельных стран. Ярko проявляются широтные и региональные закономерности растительного покрова,

его макро- и мезоструктура, основные динамические и функциональные связи только на мелкомасштабных картах (Юрковская, 2007).

При оценке современного состояния растительного покрова и параметров его биоразнообразия, а также при выявлении закономерностей его пространственно-временной организации в условиях разной степени антропогенного воздействия в мировой практике широко используется информация дистанционных изображений о структуре и свойствах растительности. Осуществлять глобальные наблюдения растительного покрова в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения, величин пространственного и временного разрешения позволяют технические возможности современных спутниковых систем дистанционного зондирования.

Спектральная отражательная способность является характерным признаком растительности и ее состояния, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Использовать аэрокосмические снимки для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния позволяют знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектрально отражательными способностями. Часто прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений для работы со спектральной информацией. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Используемые для изучения и оценки состояния растительности спектральные индексы получили общепринятое название вегетационных индексов, в настоящее время их около 160 вариантов.

Расчет базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62-0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75-1,3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Т. е. высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов (Черепанов, Дружинина, 2009).

Различные генетические типы почв, их гранулометрический состав, состояния и тенденций изменений (выделение смытых и намытых почв), материнские (почвообразующие) породы традиционно отображают почвенные карты. В рамках экологизации почвенное картографирование трансформируется в мониторинг земельных ресурсов, в задачи которого входит отслеживание изменений: эродированности почв, содержания гумуса, микроэлементов, pH,

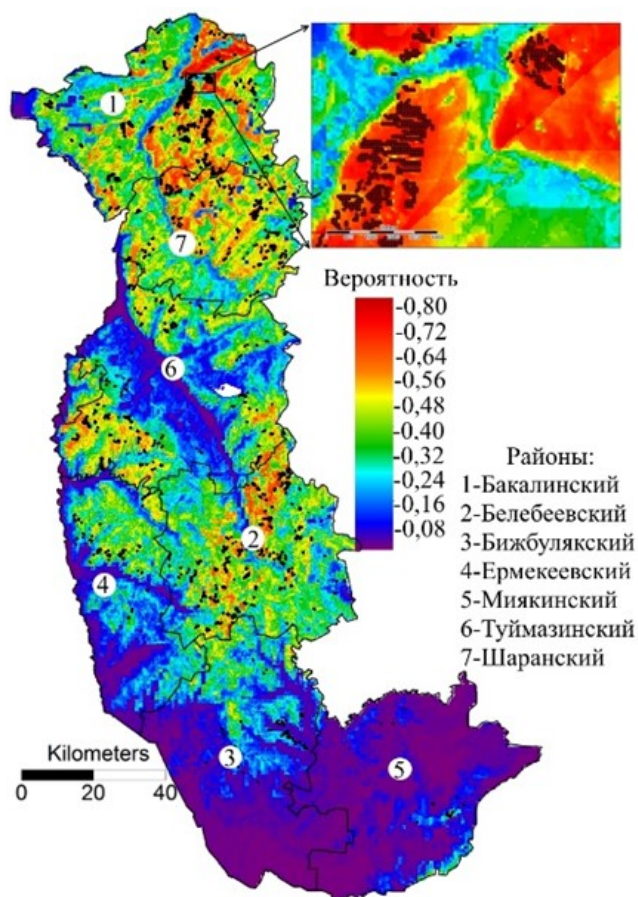


Рис. 3. Вероятность подходящих условий для формирования высокостебельных сосняков *Pinus sylvestris* L., черными кружочками показаны фактические «точки присутствия».

остаточных концентраций пестицидов, загрязнения тяжёлыми металлами и нефтепродуктами. Объектом почвенного картографирования становятся антропогенно преобразованные почвы. Свойства почв непосредственно влияют на интенсивность процессов миграции загрязняющих веществ и самоочищения, коррозионную активность. Поэтому получило распространение создание специальных почвенных карт, на которых даётся интерпретация типов и разновидностей почв с точки зрения их влияния на миграцию поллютантов.

Развитие почвенно-картографических исследований в настоящее время тесно связано со становлением цифровой почвенной картографии (Digital Soil Mapping). При этом цифровое картографирование почв определяется как создание и развитие пространственных почвенных информационных систем – *spatial soil information systems*. Подчеркивается, что расширение возможностей современных информационных систем позволяет перейти от хранения и использования оцифрованных почвенных карт к непосредственному производству почвенных карт, что и является основной целью цифрового почвенного картографирования (Сорокина, Козлов, 2009).

Такое цифровое почвенное картографирование предполагает создание цифровых карт, которые предсказывают почвы на основе факторов почвообразования. Используют так называемый метод *scorpan-SSPFe* (*soil spatial prediction function with spatially autocorrelated errors*) – метод разработки почвенной пространственно-предсказывающей функции с пространственно-автокоррелированными ошибками на базе информации о факторах *scorpan*, где *s* – почва, измеренные признаки почв в какой-либо точке; *c* – климат; *o* – организмы, включая естественную и культивируемую растительность; *r* – рельеф, включая территориальные параметры и классы; *p* – почвообразующий материал, включая литологию; *a* – возраст, фактор времени; *n* – пространство, пространственное или географическое положение (Хитров, 2012).

Визуализацию всех видов природопользования предполагают карты природопользования, однако из-за общей их локализации и перекрытий сделать это бывает достаточно затруднительно. Поэтому используется целая серия картографических изобретательских приемов: фоновые виды природопользования и крупные природоохранные территории показываются способом качественного фона, традиционными значками изображаются предприятия добывающей, обрабатывающей промышленности, энергетики и транспорта, а также объекты специального природопользования. Величина значков изменяется в зависимости от масштабности отображаемого явления. Художественные знаки используются для объектов природно-культурного наследия и рекреации. Количество жителей в населенных пунктах отражается в размере кружка по ступенчатой шкале (Зенгина и др., 2014).

На протяжении длительного времени считавшиеся традиционным результатом исследований ландшафтные карты в настоящее время становятся отправной базой для геоэкологического анализа, экологических изысканий по прогнозированию природных и природно-техногенных катастроф, оптимизации использования, охраны и преобразования культурных ландшафтов. До настоящего времени отсутствует общепринятая методика составления ландшафтных карт. В сложившихся в нашей стране ландшафтоведческих школах – московской, Санкт-Петербургской (Ленинградской), Воронежской, Иркутской и других – сформировались собственные подходы к созданию ландшафтных карт. Вследствие этого их содержание и картографическое оформление существенно различаются.

Однако большинство исследователей признает, что масштаб карты должен соответствовать таксономический ранг картографируемой природной геосистемы. Ландшафтное картографирование равнинных территорий на фациальном уровне возможно лишь в сверхкрупных масштабах – от 1:100 до 1:500. Подурочища и урочища картографируются в крупном масштабе, в интервале от 1:5 000 до 1:50 000. Географические местности и крупные урочища – главный объект среднемасштабной ландшафтной съемки – от 1:100 000 до 1:500 000. Геосистемы региональной размерности – удел мелкомасштабного картографирования.

Поскольку ландшафтная карта обычно информационно насыщена, то наиболее оптимальной формой организации и представления ее легенды служит матричный вид, в котором по сути показывается генерализованная систематика ландшафтов.

Ландшафтные карты представляют собой сложные «многослойные» картографические модели, отражающие разнообразные особенности природной среды, характеризующие природно-территориальные комплексы. Традиционно при этом используется метод наложения. Геоинформационные системы позволяют не только упростить трудоемкий процесс подобного наложения информации, но и на качественно более высоком уровне провести пространственный анализ ландшафтной структуры территории.

Выводы. Таким образом, рассмотренные основные тематические карты природы характеризуются богатым опытом и устоявшимися традициями их создания. В аспекте устойчивого развития социо-эколого-экономических систем такие карты приобретают нацеленность на отображение экологических факторов и антропогенного воздействия. С развитием ГИС-технологий и дистанционного зондирования картографический метод позволяет не только отображать на картах разнообразную информацию, но и дает возможность анализировать и познавать явления, устанавливать взаимосвязи и прогнозировать пространственные процессы.

Библиографический список

1. WorldClim - Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.worldclim.org/bioclim> (дата обращения: 07.02.2018)
2. Организация объединённых наций – Парижское соглашение по климату [Электронный ресурс]. – URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>
3. National Centers for Environmental Information (NCEI) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения: 07.02.2018).
4. European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) [Электронный ресурс]. – URL: <http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php> (дата обращения: 07.02.2018).
5. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 07.02.2018).
6. Рахматуллина, И.Р. Моделирование условий произрастания и анализ вклада факторов в формирование высокобонитетных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в программе Maxent (на примере Бугульминско-Белебеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан) [Текст] / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Э.Р. Латыпов // Природообустройство. – 2017. – №3. – С.104 -111.
7. Стурман, В.И. Современные подходы к картографированию загрязнения атмосферного воздуха за рубежом и в России / В.И.Стурман, А.В.Семакина // Известия РГО. – 2014. – Т.146, вып.2. – С.28-37.
8. Air Pollution Hotspots World Map. Earth Habitat <https://earthhabitat.wordpress.com/2010/02/23/air-pollution-hotspots-world-map/> [Электронный ресурс]. – URL: <https://earthhabitat.wordpress.com/2010/02/23/air-pollution-hotspots-world-map/> (дата обращения: 07.02.2018).
9. New Map Shows Air Pollution Throughout the World: TreeHugger [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.treehugger.com/clean-technology/new-map-shows-air-pollution-throughout-the-world.html> (дата обращения: 07.02.2018).
10. Стурман, В.И. Экологическое картографирование: учебное пособие / В.И. Стурман. – М.: Аспект Пресс, 2003. – 251 с.
11. Кошель, С.М. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа / С.М. Кошель, А.Л. Энтин // Геоморфология: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. – М.: Медиа-ИРЕСС, 2016. – Вып 6. – С.24-34.
12. Рахматуллина, И.Р. Ландшафтно-экологическое картографирование водосборов малых рек в программе SA-GA GIS (на примере реки Усень Республики Башкортостан) / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Э.Р. Латыпов // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. – 2017. – 4(1). – С.75-78
13. Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие / сост. В.Г.Калинин, С.В.Пьянков. – Пермь, 2013. – Ч.2. – 71 с.
14. Асоян, Д.С. Эколого-геоморфологическое картирование Курильских островов: методы, принципы, критерии оценки экологической обстановки / Д.С. Асоян // Известия РАН. Серия Географическая. – 2009. – №4. – С.94-103.
15. Юрковская, Т.К. Геоботаническое картографирование и составление аналитических карт растительности / Т.К. Юрковская // Актуальные проблемы геоботаники: III Всероссийская школа-конференция. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2007. – 410. – С. 43-71.
16. Черепанов, А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С.28-32.

17. Сорокина, Н.П. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова / Н.П. Сорокина, Д.Н. Козлов // Почвоведение. – 2009. – №2. – С.198-210.
18. Хитров, Н.Б. Создание детальных почвенных карт на основе интерполяции данных о свойствах почв / Н.Б. Хитров. – Почвоведение. – 2012. – №10. – С. 1045-1056.
19. Зенгина, Т.Ю. Опыт мелкомасштабного картографирования современного природопользования Республики Коми / Т.Ю. Зенгина, О.И. Котова, Г.Г. Осадчая // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – №2(18). – С.101-108.
20. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – 131 с.
21. Воробьев, О.Н. 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. – Том. 13, № 4. – С. 124-134.
22. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991 / Eds. G. Gutman, R. Volker // Springer International Publishing. – 2017. – P. 173-192.
23. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 5. – С. 154-166.
24. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
25. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS [Электронный ресурс] / Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132. – URL: <https://inter.volgattech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

References

1. WorldClim – Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS, available at: <http://www.worldclim.org/bioclim>, 07.02.2018.
2. Organizatsiya ob"edinennykh natsii – Parizhskoe soglasenie po klimatu (United Nations Organization - Paris Climate Agreement), available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>
3. National Centers for Environmental Information (NCEI), available at: <https://www.ncei.noaa.gov>, 07.02.2018.
4. European Climate Assessment & Dataset (ECA&D), available at: <http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>, 07.02.2018.
5. Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovoi tsentr dannykh (VNIIGMI-MTsD), available at: <http://meteo.ru>, 07.02.2018.
6. Rakhmatullina, I.R. Modelirovanie uslovii proizrastaniya i analiz vklada faktorov v formirovanie vysokobonitetnykh nasazhdenii sosny obyknovЕННОй (Pinus sylvestris L.) v programme Maxent (na primere Bugul'minsko-Belebeevskoi vozvyshennosti v predelakh Respubliki Bashkortostan) (Modeling of growth conditions and analysis of the contribution of factors to the formation of high-consistency of Scots pine (Pinus sylvestris L.) in the Maxent program (for example, Bugul'minsk-Belebeevskoe height within the Republic of Bashkortostan), I.R. Rakhmatullina, Z.Z.Rakhmatullin, E.R.Latypov, *Prirodoobustroistvo*, 2017, No. 3, Pp.104-111.
7. Sturman, V.I. Sovremennye podkhody k kartografirovaniyu zagryazneniya atmosfernogo vozdukha za rubezhom i v Rossii (Modern approaches to the mapping of air pollution abroad and in Russia), V.I.Sturman, A.V.Semakina, *Izvestiya RGO*, 2014, Vol. 146, No. 2, Pp.28-37.
8. Air Pollution Hotspots World Map. Earth Habitat, available at: <https://earthhabitat.wordpress.com/2010/02/23/air-pollution-hotspots-world-map>, 07.02.2018.
9. New Map Shows Air Pollution Throughout the World: TreeHugger, available at: <https://www.treehugger.com/clean-technology/new-map-shows-air-pollution-throughout-the-world.html>, 07.02.2018.
10. Sturman, V.I. Ekologicheskoe kartografirovanie (Environmental mapping), V.I. Sturman, Moscow, Aspekt Press, 2003, 251 p.
11. Koshel', S.M. Sovremennye metody rascheta raspredeleniya poverkhnostnogo stoka po tsifrovym modelyam rel'efa (Modern methods for calculating the distribution of surface runoff on digital elevation models), S.M. Koshel', A.L. Entin, Proc. Conf. *Geomorfologi: Sovremennye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya rel'efa v naukakh o Zemle*, Moscow, Media-PRESS, 2016, No. 6, Pp. 24-34.
12. Rakhmatullina, I.R. Landshaftno-ekologicheskoe kartografirovanie vodosborov malykh rek v programme SAGA GIS (na primere reki Usen' Respubliki Bashkortostan) (Landscape-ecological mapping of watersheds of small rivers in the SAGA GIS program (on the example of the Usen river of the Republic of Bashkortostan), I.R.Rakhmatullina, Z.Z.Rakhmatullin, E.R.Latypov, *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* (Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences), 2017, Vol.4, No.1, Pp.75-78.
13. Kalinin, V.G. Gidrografiya. Opredelenie gidrograficheskikh kharakteristik rek i ikh vodosborov s primeneniem tsifrovogo kartograficheskogo modelirovaniya (Hydrography. Determination of the hydrographic characteristics of rivers and their catchments using digital cartographic modeling), V.G.Kalinin, S.V.P'yankov, Perm', 2013, 71 p.

14. Asoyan, D.S. Ekologo-geomorfologicheskoe kartirovanie Kuril'skikh ostrovov: metody, printsipy, kriterii otsenki ekologicheskoi obstanovki (Ecological and geomorphological mapping of the Kuril Islands: methods, principles, criteria for assessing the ecological situation), D.S.Asoyan, Proc. Conf. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2009, No. 4, Pp. 94-103.
15. Yurkovskaya, T.K. Geobotanicheskoe kartografirovanie i sostavlenie analiticheskikh kart rastitel'nosti (Geobotanical mapping and compilation of analytical vegetation maps), T.K. Yurkovskaya, Proc. Conf. *Aktual'nye problemy geobotaniki. III Vserossiiskaya shkola-konferentsiya*, Petrozavodsk, 2007, Pp. 43-71.
16. Cherepanov, A.S. Spektral'nye svoystva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy (Spectral properties of vegetation and vegetation indices), A.S. Cherepanov, E.G. Druzhinina, *Geomatika*, 2009, No.3, Pp.28-32.
17. Sorokina, N.P. Opyt tsifrovogo kartografirovaniya struktury pochvennogo pokrova (Experience in digital mapping of soil structure), N.P. Sorokina, D.N. Kozlov, *Pochvovedenie*, 2009, No. 2, Pp. 198-210.
18. Khitrov, N.B. Sozdanie detal'nykh pochvennykh kart na osnove interpolatsii dannykh o svoystvakh pochv (Creating detailed soil maps based on interpolation of soil properties data), N.B.Khitrov, *Pochvovedenie*, 2012, No. 10, Pp. 1045-1056.
19. Zengina, T.Yu. Opyt melkomasshtabnogo kartografirovaniya sovremennogo prirodopol'zovaniya Respubliki Komi (Experience of small-scale mapping of modern environmental management of the Komi Republic), T.Yu.Zengina, O.I.Kotova, G.G.Osadchaya, *Izvestiya Komi NTs UrO RAN*, 2014, Vol. 2, No. 18, Pp. 101-108.
20. Kurbanov, E.A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti (Thematic mapping of vegetation cover using satellite images: validation and assessment of accuracy), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, S.A. Lezhnin, A.V. Gubaev, Yu.A. Polevshchikova, *Monografiya*, Joshkar-Ola, PGU, 2015, 131 p.
21. Vorob'ev, O.N. Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po snimkam Landsat (Assessment of the dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Volga region using Landsat images), O.N. Vorob'ev, E.A. Kurbanov, Yu.A. Polevshchikova, S.A. Lezhnin, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, Pp. 124-134.
22. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, "Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991", 2017, Pp. 173-192.
23. Kurbanov, E.A. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 (Recognition of forest plantations and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, C.A. Men'shikov, L.N. Smirnova, Proc. Conf. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, Pp. 154-166.
24. Vorob'ev, O.N. Distantsionnyi monitoring vosstanovitel'noi dinamiki rastitel'nosti na garyakh Marii-skogo lesnogo Zavolzh'ya (Remote monitoring of the restorative dynamics of vegetation on the burned-out areas of the Mari forest Volga region), O.N. Vorob'ev, E.A. Kurbanov, Proc. Conf. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 2, No. 14, Pp. 124-134.
25. Kurbanov, E.A. Dva desyatiletia issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS, E.A. Kurbanov, Proc. Conf. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring: sbornik nauchnykh statei*, Joshkar-Ola, PGU, 2016, No. 2, Pp. 123-132.

УДК 528.9:630. *1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА МУХАФАЗА¹ ЛАТАКИЯ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2

О.Н. Воробьев, М.С. Али

Поволжский государственный технологический университет

Важность точной и своевременной информации, характеризующей состояние и динамику лесного покрова, возрастает с течением времени, особенно в горных районах. Исследования лесного покрова по данным спутниковой съемки особенно актуальны для средиземноморских лесов, которые характеризуются пространственно-временной разнородностью, что обусловлено особым климатом, флористическим биоразнообразием и топографической изменчивостью. Целью исследования является оценка лесного покрова района Латакии Сирийской Арабской Республики с использованием спутниковых данных Sentinel-2 и результатов полевых исследований. На территории исследования были заложены 115 тестовых участков, которые позволили определиться с 5 классами наземного покрова и провести оценку точности разрабатываемого картографического материала. Исследование проводилось в несколько этапов, в результате которых была получена карта NDVI (Вегетационный индекс растительности) района Латакии, выделена маска «лесной растительности» и про-

¹Административно-территориальная единица в Сирийской Арабской Республике. Мухафазы в свою очередь делятся на манатики (районы).

ведена управляемая классификация снимка Sentinel-2. В работе также использовалась 30-метровая цифровая модель рельефа (данные NASA), что позволило учесть рельеф местности (экспозицию), а также градацию спектральной разделимости различных типов древостоев, произрастающих на склонах. Общая точность тематической классификации составила 0.76, а коэффициент Кappa – 0.73. Было установлено, что хвойные леса в горных районах Латакии представлены в основном высокополотными насаждениями общей площадью 24 тыс. га. Дубовые леса расположены на площади 4.5 тыс. га, а смешанные – на 6 тыс. га. Древесно-кустарниковая растительность занимает площадь чуть более 8 тыс. га. Результаты исследования могут способствовать повышению точности оценки количественных характеристик и динамики растительного покрова, а также развитию мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: Sentinel-2, наземный покров, Сирийская Арабская Республика, тематическое картографирование, растительный покров, NDVI.

FOREST COVER CLASSIFICATION OF LATAKIA MUHAFAZAH IN THE SYRIAN ARAB REPUBLIC WITH THE USE OF SENTINEL-2 SATELLITE

O.N. Vorobiev, M.S. Ali
Volga State University of Technology

The importance of accurate and timely information, characterizing the state and dynamics of forest cover, increases over time, especially in mountainous areas. Studies of forest cover according to data of satellite imagery are particularly relevant for Mediterranean forests, which are characterized by spatial and temporal heterogeneity, owing to the special climate, floristic biodiversity and topographic variability. The aim of the study is to assess the forest cover of the Latakia region of the Syrian Arab Republic using Sentinel-2 satellite data and field studies. On the territory of the study 115 test sites were established, which allowed to identify 5 classes of land cover, and to assess the accuracy of the developed cartographic material. We carried out the study in several stages, as a result of which the NDVI map (Vegetation index) of Latakia area was obtained, the mask of "forest vegetation" was extracted, and supervised classification of Sentinel-2 image was carried out. We also used Digital Elevation Model (NASA data), that allowed to take into account the terrain (exposure), as well as the gradation of the spectral separability of different types of tree stands growing on the slopes. The overall accuracy of the thematic classification was 0.76 and the Kappa coefficient was 0.73. We have found that coniferous forests in the mountainous areas of Latakia are mainly represented by closed forests with a total area of 24 thousand hectares. Oak forests are located on an area of 4.5 thousand hectares, and mixed forests are on 6 thousand hectares. Tree-shrub vegetation covers an area of just over 8 thousand hectares. The study results may improve assessment accuracy of the quantitative characteristics and vegetation cover dynamics, as well as the development of environmental monitoring.

Key words: Sentinel-2, land cover, Syrian Arab Republic, thematic mapping, vegetation cover, NDVI.

Введение

В последние годы во всем мире запускается все большее количество новых спутников, а также разрабатываются программные средства, обеспечивающие данные и обработку изображений по исследованию наземного покрова планеты (Курбанов, 2016). Спутниковые данные широко используются исследователями для оценки и мониторинга растительного покрова, прогнозирования пожарной опасности лесов, влияния климата на леса, процессов деградации и опустынивания территорий (Loboda et al., 2017; Терехин, 2017; Воробьев, Курбанов, 2017).

Решение этих вопросов обычно проводится на основе различных методов классификации изображений дистанционного зондирования (Noi, Karpas, 2017) с целью получения тематических карт наземного покрова (Барталев и др., 2016). Классификация, основанная на выделении объектов на земной поверхности по различным спектральным отражательным характеристикам, является эффективным способом извлечения информации о растительном покрове с изображений дистанционного зондирования (Jwan, 2013; Puletti et al., 2017). При этом подходы к классификации спутниковых изображений могут быть разделены на две общие категории: 1) классификация на основе пикселей, 2) объектно-ориентированная классификация (Blaschke et al., 2014; Курбанов и др., 2014; Chen et al., 2018).

Развитие методов дистанционного зондирования в ближайшие годы позволит повысить точность распознавания структуры лесных насаждений и проводить оценку их биоразнообразия (Fassnacht et al., 2013; Pouteau et al., 2018). Более детальная классификация лесов с выделением отдельных древесных пород и типов леса, отличающихся своей фенологической динамикой, может быть достигнута за счет использования разновременных спутниковых изображений (Жарко, Барталев, 2014; Karasiak et al., 2017; Курбанов и др., 2018). Существуют исследования, использующие метод фьюжн (слияния) двух снимков (например, Landsat-8 и Sentinel-2) для повышения точности выделения древесных пород при тематической классификации (Wang et al., 2017; Wang, Atkinson, 2018). Также интерес представляет получение более точных моделей, предсказывающих будущие сдвиги ареалов произрастания древесных пород, в рамках исследований изменения климата (Sheeren et al., 2016; Wang, Lu, 2017).

Исследования наземного покрова по данным спутниковой съемки особенно актуальны для средиземноморских лесов, которые характеризуются пространственно-временной разнообразностью, что обусловлено особым климатом, флористическим биоразнообразием и топографической изменчивостью (Али, 2017). Высокое разнообразие и фрагментированность растительного покрова, сухость почв, известняки и высокая отражательная способность в этом регионе являются ограничивающими факторами, влияющими на точность картографирования лесных насаждений (Pignatti et al., 2009; Etteieb et al., 2013; Gomariz-Castillo et al., 2017).

Для устранения таких ограничений и повышения точности картирования растительного покрова следует использовать спутниковые данные высокого разрешения Sentinel-2, которые предоставляют новые возможности для создания точных наборов мультиспектральных данных в готовом к использованию векторном формате (Belgiu, Csillik, 2018). Sentinel-2 – это спутник нового поколения, разработанный Европейским космическим агентством, для обеспечения наземного мониторинга и продолжение миссий Landsat и SPOT (ESA introducing..., 2018). Этот спутник сочетает в себе высокое пространственное и временное разрешение, новые спектральные возможности и широкий охват, что дает больше преимуществ перед спутниками Landsat в области регионального землепользования и классификации наземного покрова (Immitzer et al., 2016; Zheng et al., 2017). Спутниковые снимки Sentinel-2 обладают большим потенциалом для повышения точности классификации типов леса и их породного состава (Puletti et al., 2017).

Цель работы – классификация и оценка лесного покрова территории мухафаза (административная единица) Латакия Сирийской Арабской Республики (САР) по данным спутниковой съемки Sentinel-2.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- подобран спутниковый снимок Sentinel-2 на территорию исследования;
- разработана легенда классов лесного покрова на мухафаз Латакия;
- проведена классификация сцены Sentinel-2, получена тематическая карта на район исследования;
- проведены оценка точности картографирования и анализ лесного покрова мухафаза Латакия.

Материалы и методы

Объект исследования. Объектом исследований явились лесные насаждения в манатике (районе) Латакия на территории мухафаза Латакия САР, расположенной на восточном побережье Средиземного моря (рис. 1). Горные цепи в САР тянутся с севера на юг страны и включают холмистую местность, расположенную параллельно границе побережья Средиземного моря, разделяющую страну на влажную, западную часть и засушливую, восточную. Лесные территории расположены в основном в прибрежной зоне (Азия – географический атлас, 2018).

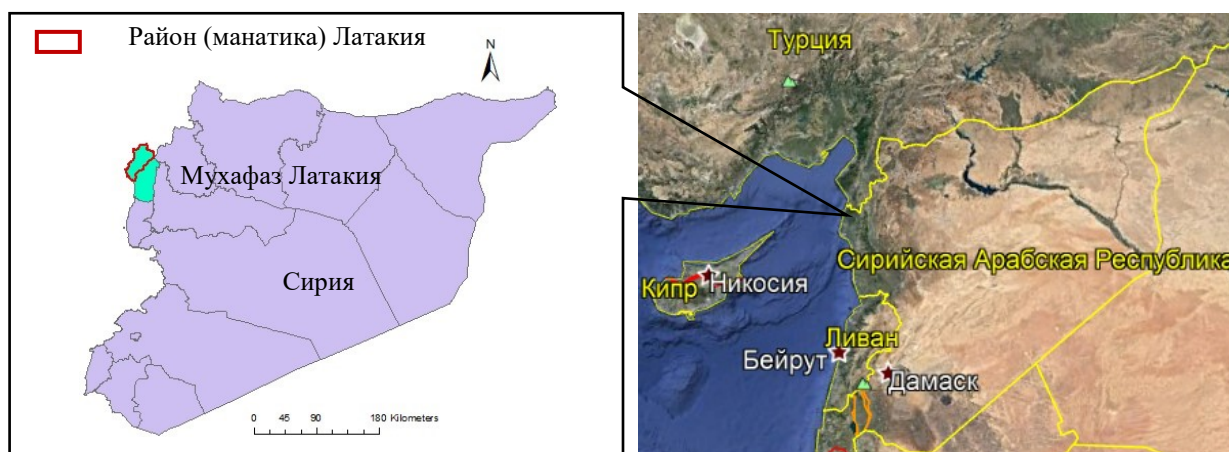


Рис. 1. Район (манатика) Латакия, входящая в мухафаз Латакия САР (Ресурс -Yandex Карта)

Методика и материалы исследования.

Работа со снимками велась в программных комплексах ENVI 5.2 и ArcGis 10.3. На территорию исследования был получен спутниковый снимок Sentinel-2 (S2B_TILE_20170903T1_T36SYE) от 03.09.2017. Снимок Sentinel-2 прошел радиометрическую и атмосферную коррекцию, с уровнем обработки 1C (Level-1C, Top of atmosphere reflectance). В результате был сформирован мультиспектральный композит на основе каналов 2,3,4,8 в спектральном диапазоне (RGB и NIR) и с пространственным разрешением 10 м/пкс. Для оценки лесного покрова использовался только фрагмент сцены Sentinel-2 по границе территории исследования (рис. 2).

Полевые исследования. В 2018 г. аспирантом Поволжского государственного технологического университета М.С. Али были заложены тестовые участки (эталон) в районе исследования. Подбор тестовых участков осуществлялся для последующей валидации и оценки точности разрабатываемого картографического материала лесного покрова района Латакия. Для этого использовались

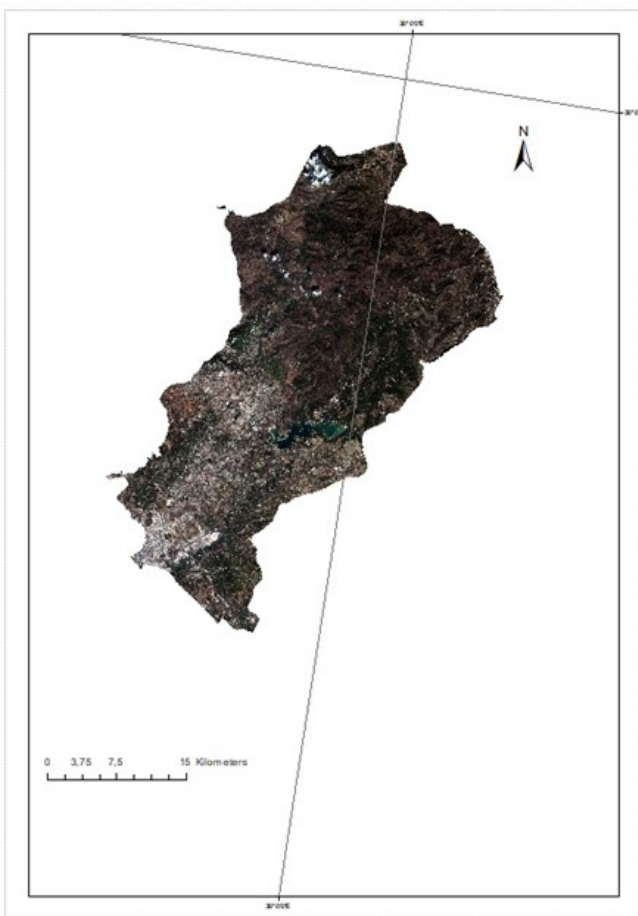


Рис. 2. Фрагмент мультиспектрального изображения Sentinel-2 (RGB и NIR) по границе района Латакия

существующие карты лесных насаждений на территорию исследования и материалы спутниковой съемки высокого разрешения (Yandex, Google, SAS Planet, Sentinel-2). Главным условием при подборе тестовых участков была их репрезентативная представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследования. Для идентификации на спутниковом снимке Sentinel-2 площадь тестовых участков на местности составляла на местности не менее 0,5 га. Оценка древостоев проводилась методом наземной глазомерно-измерительной таксации. Для выбранного тестового участка определялся состав (не менее 70% главной породы), величина проекционного покрытия, средняя высота и диаметр насаждения, а также возраст преобладающей породы древостоя. В течение полевого сезона было исследовано 115 тестовых участков, представленных следующими классами древесных пород:

Древостой с преобладанием сосны калабрийской (Pinus brutia) – наиболее широко распространенной древесной породы Сирии, произрастающей в субгумидных и полусухих биоклиматических зонах от побережья Латакии в горных районах. Деревья этой породы могут достигать средней высоты 20-22 м. В зависимости от условий местопроизрастания в подлеске древостоя встречаются различные кустарники.

Древостой с преобладанием дуба австрийского (турецкого) (Quercus cerris) занимают участки в западных предгорьях на высотах от 900 до 1250 м и между 900 и 1100 м над уровнем моря на восточных склонах. Высота деревьев может достигать до 40 м. Насаждения, представленные дубом австрийским, могут произрастать совместно с некоторыми другими древесными породами: дуб инфекционный/лузитанский (*Quercus infectoria*), граб восточный (*Carpinus orientalis*), хмелеграб обыкновенный (*Ostrya carpinifolia*), багрянник европейский (*Cercis siliquastrum*), ясень белый (*Fraxinus ornus*).

Древостой с преобладанием кипариса вечнозеленого (Cupressus sempervirens), произрастающего на сирийско-турецкой границе. Данные древостои довольно часто имеют в подросте и подлеске следующие древесно-кустарниковые породы: дуб кermесовый (*Quercus calliprinos*), цератония стручковая или рожковое дерево (*Ceratonia Siliqua*), лавр благородный (*Laurus nobilis*), фисташка палестинская (*Pistacia palaestina*). Такие древостои в последнее время находятся в нарушенном состоянии.

Смешанные леса открытого типа (полнота менее 50%) представляют собой древостои, состоящие из двух типов древесных пород – лиственных и хвойных. Лиственные породы могут быть представлены листопадными породами, например, лавром благородным, лиственными вечнозелеными, например, цератонией стручковой и другими. Хвойные породы представлены соснами калабрийской и итальянской (*Pinus pinea*), имеющими как естественное, так и искусственное происхождение. Все смешанные древостои могут иметь более сложный породный состав за счет большого разнообразия в составе древостоев других древесных и кустарниковых пород.

Древесно-кустарниковая растительность представлена деревьями высотой до 3 м, включая практически все вышеперечисленные породы деревьев, а также можжевельник колючий (*Juniperus oxycedrus*), рожковое дерево, клен сирийский (*Acer syriacum*) и другие породы, которые характеризуются невысокой производительностью, что связано с худшими условиями места произрастания. В этом классе представлены в основном засухоустойчивые растения. Кроме того, растения этого класса обычно являются пионерами после лесных пожаров. Смешанная с деревьями кустарниковая растительность представлена следующими породами высотой до 2 м: ракитник мохнатый (*Calycotome villosa*), дрок колючеветвистый (*Genista acanthoclada*), ладанник (*Cistus villosus*). Наличие в составе такой растительности черноголовника колючего (*Poterium spinosum*) указывает на сухость почвы, что может сказаться на ухудшении общего состояния лесных насаждений.

Тестовые участки были также заложены и на нелесных землях: травянистый покров, населенные пункты, водные объекты, участки, не покрытые растительностью.

Для проведения классификации спутниковых данных была сформирована легенда на 5 тематических классов лесного покрова, представленных в пределах границ территории исследования (табл. 1).

Таблица 1

Легенда тематической карты наземного покрова для сцены Sentinel-2

Наименование класса	Код класса	Класс	Фото
Хвойные насаждения	С	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем хвойных вечнозеленых пород высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70%. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающая порода – сосна калибрийская	
Лиственные насаждения	В	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем лиственных пород высотой более 3 м, сомкнутостью полога более 75%. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающие породы – дуб австрийский и псевдосирийский (<i>Quercus cerris</i> sp. <i>Pseudocerris</i>)	
Насаждения кипариса	CS	Основной ярус под вечнозелёными деревьями высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 50%. Преобладающая порода составляет более 70% от состава насаждения. Кипарис вечнозелёный	
Смешанные насаждения	ТМО	Представлены деревьями высотой более 3 м, где ни лиственные, ни вечнозеленые хвойные породы не составляют > 60% от состава насаждения. Сомкнутость полога составляет 15-60%. Основные породы – сосна калибрийская, дуб австрийский и псевдосирийский	
Древесно-кустарниковая растительность	TS	Растительность высотой до 3 м, с площадью проективного покрытия более 50%. Представлена низкорастущими деревьями высотой до 3 м: сосна калибрийская, дуб австрийский и псевдосирийский, можжевельник колючий, рожковое дерево. Среди кустарников встречаются: ракитник мохнатый, дрок колючеветвистый и др.	

Тематическая классификация снимка Sentinel-2 проводилась в несколько этапов (рис. 3).

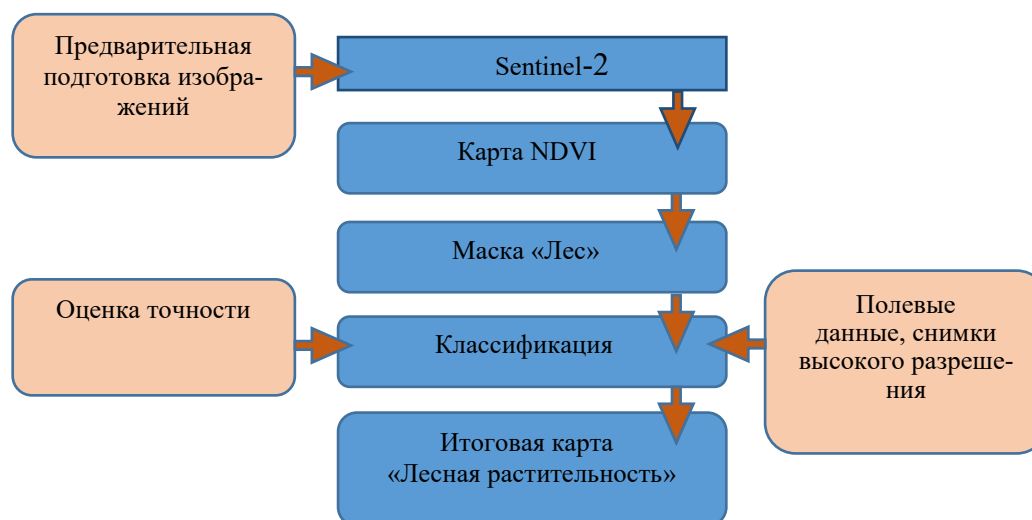


Рис. 3. Блок-схема тематической классификации фрагмента сцены Sentinel-2

На первом этапе была получена карта NDVI (Вегетационный индекс растительности) района Латакия.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где: NIR - ближняя инфракрасная зона спектра, RED - красная зона спектра. Диапазон значений индекса от -1 до +1, для растительного покрова значения индекса начинаются от 0,2 и выше (рис. 4).

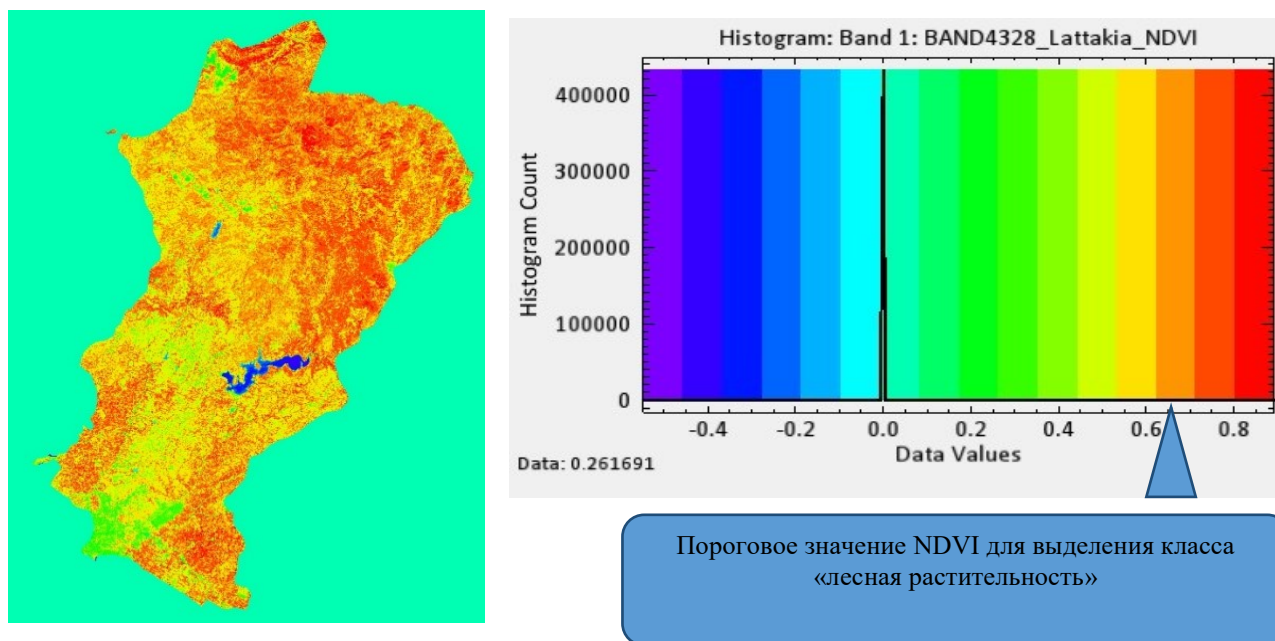


Рис. 4. Тематическая карта NDVI (слева) и диапазон полученных данных (справа). Показатель 0,6-0,9 NDVI указывает на высокую плотность насаждений для лесов умеренных широт и тропиков (Pettorelli, 2013)

На основе полученной карты NDVI с применением методики бинарного геокодирования в пакете ENVI был выделен тематический слой со значениями выше 0.65, что позволило получить в виде маски векторного слоя полигональные границы класса «лесная растительность» для последующего детального картографирования (рис. 5).

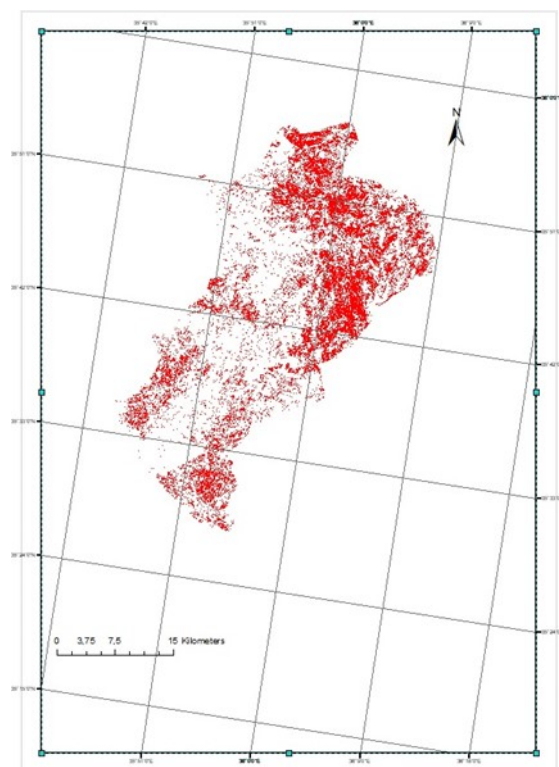


Рис. 5. Векторный слой «лесная растительность» на базе снимка S2, района Латакия

Последующая управляемая классификация лесных земель методом «дерево решений» проводилась на основе выделенной векторной «маски» с использованием 30-метровой цифровой модели рельефа (данные NASA). Это позволило учесть рельеф местности (экспозицию), а также градицию спектральной разделимости различных типов древостоев, произрастающих на склонах. После проведения процедуры классификации был получен картографический материал на территорию исследования (рис. 6).

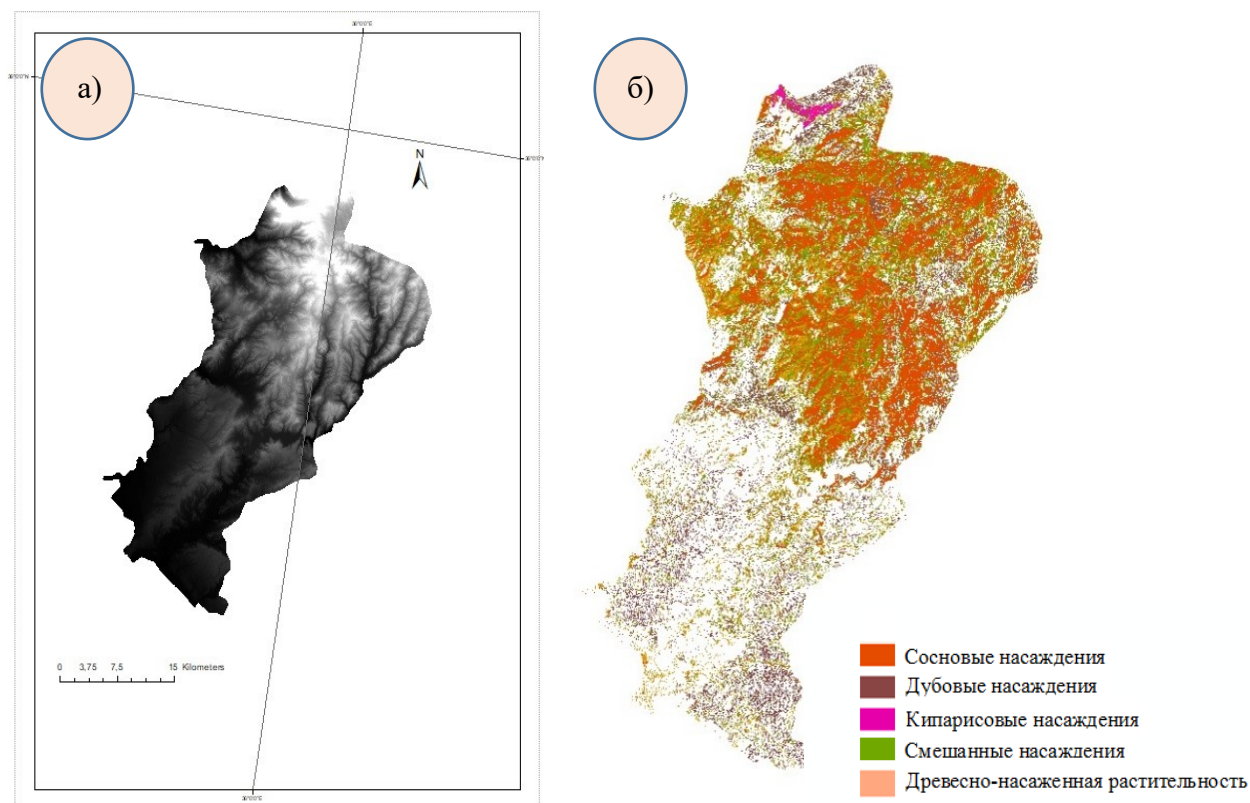


Рис. 6. Карты на территорию района Латакия: а) цифровая модель рельефа (DEM, 30 м); б) тематическая карта 2018 г. по результатам управляемой классификации «дерево решений»

Оценка точности полученной тематической карты была проведена по матрице различий на основе данных полевых исследований, снимков высокого разрешения и экспертного анализа спектральной разделимости в пакете (табл. 2). Общая точность классификации достигает 0.76, коэффициент Каппа – 0.73.

Таблица 2

Данные оценки точности тематического картографирования спутникового изображения Sentinel-2

Классы	С	Д	К	См	ДК	Всего	Точность пользователя UA%
С	623	49	2	31	32	737	84,5
Д	13	216	20	41	78	368	58,7
К	3	4	284	12	2	305	60,3
См	71	71	9	301	46	498	45,8
ДК	38	12	12	59	511	632	80,9
Всего	748	352	327	444	669	1935	
Точность производителя PA%	83,3	61,4	56,3	51,4	76,4		

Далее полученные тематические классы прошли процедуру генерализации в пакете ENVI и векторизации в программном пакете ArcMap. Экспертным путем из тематической карты «лесная растительность» были исключены участки искусственного происхождения «сельскохозяйственные земли» или «сады» (рис. 7, табл. 3.)

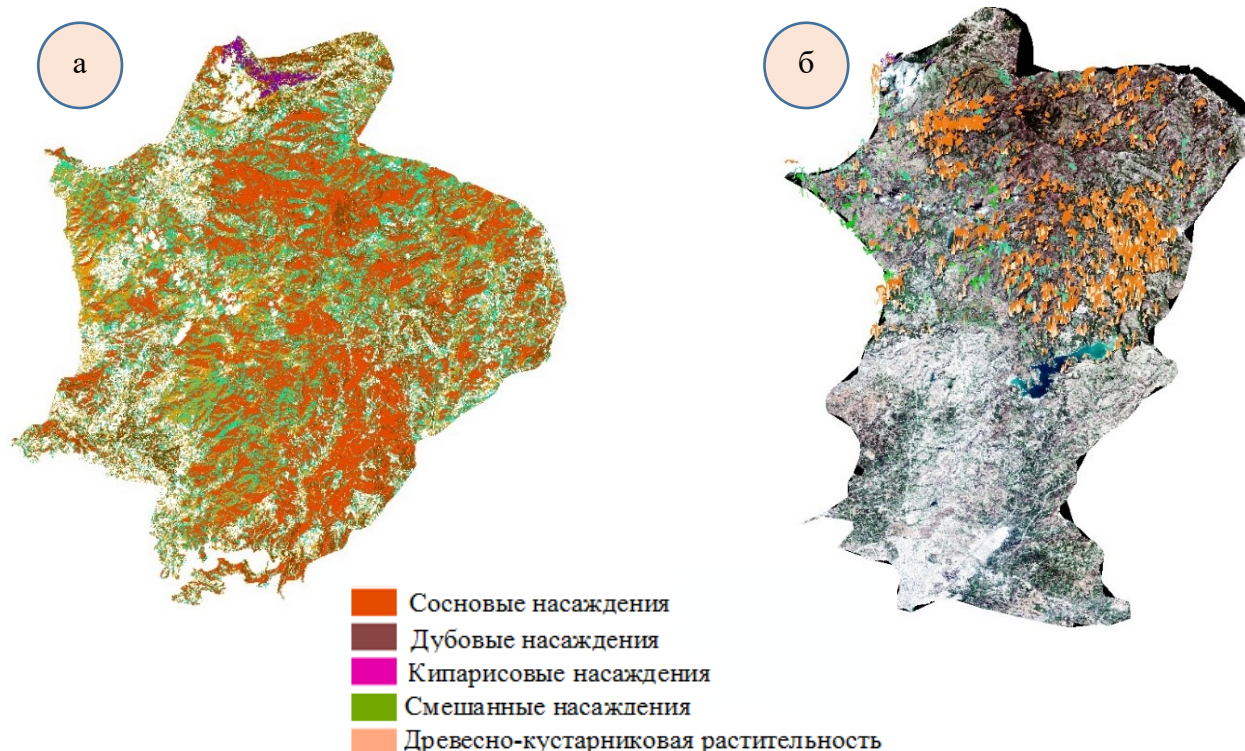


Рис. 7. Тематическая карта «лесной растительности» района Латакия: а) после генерализации; б) совмещенная с цифровой моделью рельефа

Результаты и выводы. По результатам классификации были получены пространственные и количественные характеристики распределения древесно-кустарниковой растительности на территории провинции Латакия Сирийской Арабской Республики.

Применение современных методов классификации данных дистанционного зондирования на основе уникальных спектральных сигнатур для каждого класса лесного покрова, полученных на базе данных полевых исследований, позволило получить картографический материал с высокой точностью (коэффициент Каппа 0,73). Было установлено, что большинство лесов в Латакии расположены в горных районах с высоким углом уклона на местности (высокие го-

Таблица 3

Распределение классов лесного покрова в районе Латакия на тематической карте

№	Наименование класса по легенде	Код по легенде	Площадь		
			пиксели	га	%
1	Сосновые насаждения	PB	2407300	24073	55
2	Дубовые насаждения	Q	443952	4439.52	10
3	Кипарисовые насаждения	CS	28599	248.99	1
4	Смешанные наса	TMO	617640	6176.4	14
5	Древесно-кустарниковая растительность	SMO	845521	8455.21	19
Всего:				43393	100

ры и крутые склоны). Хвойные леса в данном районе представлены в основном высокополнотными насаждениями общей площадью 24 тыс. га. Подлесок таких лесов представлен различными кустарниками и травянистой растительностью, что характерно для лесов с повышенным уровнем пожароопасности. Дубовые леса расположены на территории 4.5 тыс. га, а смешанные – на 6 тыс. га. Древесно-кустарниковая растительность занимает площадь немногим более 8 тыс. га.

Близость лесов на отдельных участках к сельскохозяйственным угодьям повышает вероятность деградации лесов в результате антропогенной деятельности, включая пожары. Территория Латакии характеризуется полусухим средиземноморским климатом летом и частыми периодами засухи, что приводит к опасности возникновения лесных пожаров и сложности их предотвращения и ликвидации.

Спутниковые данные Sentinel-2 предоставляют новые возможности для проведения долгосрочного мониторинга наземного покрова в целом для всей Сирийской Арабской Республики. Использование данных спутника Sentinel-2 в сочетании с ГИС технологиями позволяет проводить высококачественный мониторинг окружающей среды с целью обнаружения изменений, которые могут помочь при оценке процесса сведения и деградации лесов.

Работа была поддержана программой Erasmus + Jean Monnet Европейского союза (проект № 574894-EPP-1-2016-1-RU-EPPJMO-CoE). Данная публикация отражает точку зрения авторов, Европейская Комиссия не несет ответственности за содержание данной публикации и ее дальнейшее использование.

Библиографический список

- Али, М.С. Картографирование растительного покрова Сирийской Арабской Республики по данным спутника MODIS [Электронный ресурс] // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / М.С. Али. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – № 3. – С. 74-84. – URL: <https://inter.volgatex.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
- Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
- Жарко, В.О. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектральноотражательных характеристик / В.О. Жарко, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 159–170.
- Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
- Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 5. – С. 154-166.
- Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS [Электронный ресурс] // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 123-132. – URL: <https://inter.volgatex.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

inter.volgattech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/

7. Курбанов Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 36–48.
8. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.
9. Терехин, Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 4. – С. 112-124.
10. Атлас Мира. Азия – географический атлас [Электронный ресурс]. – URL: <http://world-karta.ru/syria-map.html>.
11. Belgiua, M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis / M. Belgiua, O. Csillik // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 204. – P. 509-523.
12. Blaschke, T. Geographic object-based image analysis— towards a new paradigm / T. Blaschke, G.J. Hay, M. Kelly, S. Lang, P. Hofmann, E. Addink, R.Q. Feitosa, F. van der Meer, H. van der Werff, F. van Coillie et al. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 87. – P. 180-191.
13. Chen, Y. Enhancing Land Cover Mapping through Integration of Pixel-Based and Object-Based Classifications from Remotely Sensed Imagery / Y. Chen, Y. Zhou, Y. Ge, R. An, Y. Chen // Remote Sensing. – 2018. – Vol 10 (77). – P. 1-15.
14. ESA Introducing Sentinel-2 [Electronic resources]. – URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2
15. Etteieb, S. Mediterranean forest mapping using hyper-spectral satellite imagery / S. Etteieb, M. Louhaichi, C. Kalaitzidis, I.Z. Gitas // Arabian journal of geosciences. – 2013. – Vol. 6. – Issue. 12. – P. 5017–5032.
16. Fassnacht, E.F. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data / F. E. Fassnacht, H. Latifi, K. Stereńczak et al. // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 186. – P. 64-87.
17. Gomariz-Castillo, F. Improving Classification Accuracy of Multi-Temporal Landsat Images by Assessing the Use of Different Algorithms, Textural and Ancillary Information for a Mediterranean Semiarid Area from 2000 to 2015/ F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarria, F. Canovas-Garcia // Remote Sensing. – 2017. – Vol 9 (1058). – P. 1-23.
18. Immitzer, M. First Experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe / M. Immitzer, F. Vuolo, and C. Atzberger // Remote Sensing. – 2016. – Vol 8 (166). – P. 1-27.
19. Jwan, A. Image Classification in Remote Sensing / A. Jwan, B.M. Shattri, H.Z. Mohd Shafri // Journal of Environment and Earth Science. – 2013. – Vol. 3 (10). – P. 141-147.
20. Karasiak, N. Mapping tree species of forests in southwest France using Sentinel-2 image time series / N. Karasiak, D. Sheeren, M. Fauvel, J. Willm, J.F. Dejoux, C. Monteil // 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp)/ – Brugge, 2017. – P. 1-4.
21. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991 / Eds. G. Gutman, R. Volker // Springer International Publishing. – 2017/ – P. 173-192.
22. Noi, P.T. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery/ P.T. Noi, M. Kappas // Sensors. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 1-20.
23. Pettorelli, N. The Normalized Difference Vegetation Index / N. Pettorelli. – Oxford. – 2013. – 194 p.
24. Pignatti, S. Evaluating Hyperion capability for land cover mapping in a fragmented ecosystem: Pollino National Park, Italy/ S. Pignatti, R.M. Cavalli, V. Cuomo, L. Fusilli, S. Pascucci, M. Poscolieri, F. Santini // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113 (3). – P. 622-634.
25. Pouteau, R. Predicting Tropical Tree Species Richness from Normalized Difference Vegetation Index Time Series: The Devil Is Perhaps Not in the Detail / R. Pouteau, T.W. Gillespie, P. Birnbaum // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10 (5). – P. 1-15.
26. Puletti, N. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments / N. Puletti, F. Chianucci, C. Castaldi // Annals of silvicultural research. – 2017.
27. Sheeren, D. Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series / D. Sheeren, M. Fauvel, V. Josipovic, et al. // Remote Sens. – 2016. – Vol. 8 (734). – P. 1-29.
28. Wang, Q. Fusion of Landsat 8 Oli and Sentinel-2 MSI data / Q. Wang, G.A Blackburn, A.O. Onojeghuo // IEEE Trans Geosci // Remote Sens. – 2017.
29. Wang, Q. Spatio-temporal fusion for daily Sentinel-2 images / Q. Wang, P.M. Atkinson // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 204. – P. 31- 42.
30. Wang, Y. Mapping Torreya Grandis spatial distribution using high spatial resolution satellite imagery with the expert rules-based approach / Y. Wang, D. Lu // Remote Sensing. – 2017. – Vol 9 (564). – P. 1-19.
31. Zheng, H. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for Land Use and Land Cover classification by Spectral-Spatial features / H. Zheng, P. Du, J. Chen, J. Xia, E. Li, Z. Xu et al. // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9 (1274). – P. 1-17.

References

1. Ali, M.S. Kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Sirijskoj Arabskoj Respubliki po dannym sputnika MODIS (Mapping of the vegetation cover of the Syrian Arab Republic according to the MODIS satellite), M.S. Ali, Proc. Conf. *Lesnye ehkositemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring: sbornik nauchnykh statej*, Joshkar-Ola, 2017, No. 3, Pp. 74-84.
2. Bartalev, S.A. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii (Satellite mapping of vegetation cover in Russia), S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.O. Zharko, E.A. Lupyran, D.E. Plotnikov, S.A. Hvostikov, N.V. Shabanov, Moscow, 2016, 208 p.
3. Zharko, V.O. Ocenka raspoznavаемости drevesnyh porod lesa na osnove sputnikovykh dannykh o sezonnykh izmeneniyah ih spektral'nootrazhatel'nykh harakteristik (Evaluation of recognizability of tree species of forest based on satellite data on seasonal changes in their spectral reflective characteristics), V.O. Zharko, S.A. Bartalev, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, Pp. 159-170.
4. Vorob'ev, O.N. Distancionnyj monitoring vosstanovitel'noj dinamiki rastitel'nosti na garyah Marijskogo lesnogo Zavolzh'ya (Remote monitoring of the restorative dynamics of vegetation on the burned areas of the Mari forest Volga region), O.N. Vorob'ev, E.A. Kurbanov, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 2, No. 14, Pp. 124-134.
5. Kurbanov, E.A. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenij i dominiruyushchih drevesnyh porod Penzenskoj oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 (Recognition of forest stands and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, C.A. Men'shikov, L.N. Smirnova, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, Pp. 154-166.
6. Kurbanov, E.A. Dva desyatiletiya issledovanij rastitel'nogo pokrova po MODIS (Two decades of vegetation research on MODIS), E.A. Kurbanov, Proc. Conf. *Lesnye ehkositemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring*, Joshkar-Ola, 2016, Pp. 123-132.
7. Kurbanov E.H.A. Ocenka tochnosti i sopostavimosti tematiceskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya (Assessment of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolution on the example of the Middle Volga region), E.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, Yu.A. Polevshchikova // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. –2016. –Т. 13. – № 1. –S. 36–48.
8. Kurbanov, E.A. CHetyre desyatiletiya issledovanij lesov po snimkam Landsat / E.H.A. Kurbanov, O.N. Vorob'ev, A.V. Gubaev, S.A. Lezhnin, Yu.A. Polevshchikova, E.N. Demisheva, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, Vol. 1, No. 21, Pp. 18-32.
9. Terekhin, E.A. Ocenka narushennosti lesnykh ehkositem yugo-zapada Srednerusskoj vozvyshehnosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok (Evaluation of disturbance of forest ecosystems of the south-west of the Central Russian Upland using materials from space imagery), E.A. Terekhin, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, Pp. 112-124.
10. Atlas Mira. Aziya – geograficheskij atlas (Atlas of the World. Asia – geographical atlas), available at: <http://world-karta.ru/syria-map.html>
11. Belgiua, M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis, M. Belgiua, O. Csillik, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, Pp. 509-523.
12. Blaschke, T. Geographic object-based image analysis – towards a new paradigm, T. Blaschke, G.J. Hay, M. Kelly, S. Lang, P. Hofmann, E. Addink, R.Q. Feitosa, F. van der Meer, H. van derWerff, F. van Coillie et al., *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, Vol. 87, Pp. 180-191.
13. Chen, Y. Enhancing Land Cover Mapping through Integration of Pixel-Based and Object-Based Classifications from Remotely Sensed Imagery, Y. Chen, Y. Zhou, Y. Ge, R. An, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 77, Pp. 1-15.
14. ESA Introducing Sentinel-2, available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2
15. Etteieb, S. Mediterranean forest mapping using hyper-spectral satellite imagery, S. Etteieb, M. Louhaichi, C. Kalaitzidis, I.Z. Gitas, *Arabian journal of geosciences*, 2013, Vol. 6, No. 12, Pp. 5017-5032.
16. Fassnacht, E.F. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data, F. E. Fassnacht, H. Latifi, K. Stereńczak et al., *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 186, Pp. 64-87.
17. Gomariz-Castillo, F. Improving Classification Accuracy of Multi-Temporal Landsat Images by Assessing the Use of Different Algorithms, Textural and Ancillary Information for a Mediterranean Semiarid Area from 2000 to 2015, F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarria, F. Canovas-Garcia, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 1058, Pp. 1-23.
18. Immitzer, M. First Experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe, M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 166, Pp. 1-27.
19. Jwan, A. Image Classification in Remote Sensing, A. Jwan, B.M. Shattri, H.Z. Mohd Shafri, *Journal of Environment and Earth Science*, 2013, Vol. 3, No. 10, Pp. 141-147.
20. Karasiak, N. Mapping tree species of forests in southwest France using Sentinel-2 image time series, N. Karasiak, D. Sheeren, M. Fauvel, J. Willm, J.F. Dejoux, C. Monteil, Proc. Conf. *9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp)*, Brugge, 2017, Pp. 1-4.
21. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, 2017, Pp. 173-192.
22. Noi, P.T. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery, P.T. Noi, M. Kappas, *Sensors*, 2017, Vol. 18, No. 1, Pp. 1-20.
23. Pettorelli, N. The Normalized Difference Vegetation Index, Oxford, 2013, 194 p.

24. Pignatti, S. Evaluating Hyperion capability for land cover mapping in a fragmented ecosystem: Pollino National Park, Italy, S. Pignatti, R.M. Cavalli, V. Cuomo, L. Fusilli, S. Pascucci, M. Poscolieri, F. Santini, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 3, Pp. 622-634.
25. Pouteau, R. Predicting Tropical Tree Species Richness from Normalized Difference Vegetation Index Time Series: The Devil Is Perhaps Not in the Detail, R. Pouteau, T.W. Gillespie, P. Birnbaum, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 5, 698 p.
26. Puletti, N. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments, N. Puletti, F. Chianucci, C. Castaldi, *Annals of silvicultural research*, 2017.
27. Sheeren, D. Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series, D. Sheeren, M. Fauvel, V. Josipovic et al., *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 734, Pp. 1-29.
28. Wang, Q. Fusion of Landsat 8 Oli and Sentinel-2 MSI data, Q. Wang, G.A Blackburn, A.O. Onojeghuo, *IEEE Xplore: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017.
29. Wang, Q. Spatio-temporal fusion for daily Sentinel-2 images, Q. Wang, P.M. Atkinson, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, Pp. 31- 42.
30. Wang, Y. Mapping *Torreya Grandis* spatial distribution using high spatial resolution satellite imagery with the expert rules-based approach, Y. Wang, D. Lu, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 564, Pp. 1-19.
31. Zheng, H. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for Land Use and Land Cover classification by Spectral-Spatial features, H. Zheng, P. Du, J. Chen, J. Xia, E. Li, Z. Xu et al., *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 1274, Pp. 1-17.

СОДЕРЖАНИЕ

Liu G., Wang J. Identifying individual wood location from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at forest Plot Level.....	6
Bottaro G., Pettenella D. Assessing the impacts of climate change on mountain forests: a brief review.....	16
Швецов Е.Г., Парфенова Е.И., Чебакова Н.М. Мониторинг изменений растительности на территории Средней Сибири за период 1990-2015 гг. по данным Landsat	30
Терехин Э.А. Анализ спектрально-отражательных свойств нарушенных лесных экосистем лесостепной зоны на основе разновременных спутниковых данных	39
Хуторова Н.А. Современные тренды развития «зеленой» экономики в России.....	47
Шалаев В.С. Об исследованиях «лесной продукции».....	59
Демаков Ю.П., Исаев А.В., Богданов Г.А. Изменение температуры почвы на территории Республики Марий Эл за последние полвека.....	64
Демаков Ю.П., Нуреева Т. В. Производительность хвои и камбия среднего дерева в культурах сосны разной исходной густоты.....	75
Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Оценка изменчивости площади участков островного местонахождения сосны кедровой сибирской в связи с их географическим положением в Республике Коми.....	82
Мартынова М.В., Султанова Р.Р., Габделхаков А.К. Экономическая оценка экологических функций лесов Республики Башкортостан.....	92
Рахматуллин З.З., Рахматуллина И.Р., Габделхаков А.К. Картографические методы исследований объектов природы.....	100
Воробьев О.Н., Али М.С. Классификация лесного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по данным спутника Sentinel-2.....	110

CONTENTS

Liu G., Wang J. Identifying individual wood location from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at forest Plot Level.....	6
Bottaro G., Pettenella D. Assessing the impacts of climate change on mountain forests: a brief review.....	16
Shvetsov E.G., Parfenova E.I., Tchebakova N.M. Monitoring of vegetation changes in the Central Siberia between 1990 and 2015 using Landsat data.....	30
Terekhin E.A. Analysis of the spectral and reflective properties of disturbed forest ecosystems in forest-steppe zone using multitemporal remote sensing data.....	39
Khutorova N.A. Modern trends of Russian green economy.....	47
Shalaev V.S. Research into «Forest products».....	59
Demakov Yu.P., Isaev A.V., Bogdanov G.A. Dynamics of soil temperature in Mari El Republic over the past fifty years.....	64
Demakov Yu.P., Nureeva T.V. Productivity of needles and cambium in pine trees with different initial density.....	75
Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Assessment of area variability of island plots of the Siberian stone pine in connection with their geographical location in the Komi Republic.....	82
Martynova M., Sultanova R., Gabdelhakov A. Economic evaluation of ecological functions of forests in the Republic of Bashkortostan.....	92
Rakhmatullin Z.Z., Rakhmatullina I.R., Gabdelkhakov A.K. Cartographic methods of nature objects researches.....	100
Vorobiev O.N., Ali M.S. Forest cover classification of Latakia Muhafazah in the Syrian Arab Republic with the use of Sentinel-2 satellite.....	110

Научное издание

**ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ**

Международный сборник научных статей

Редактор *Л. С. Емельянова*
Компьютерная верстка *С. А. Лежнин*
Переводчики *М. Н. Курдюмова, А.Э. Эшполдина*

Подписано к использованию *25.12.2018*

Поволжский государственный технологический университет
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Редакционно-издательский центр ПГТУ
424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3