

УДК 528.94; 912.43-13

О.Д. Васильев^{1,2}

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СРЕДООБРАЗУЮЩИХ ФУНКЦИЙ ЛЕСОВ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ЛАНДШАФТАХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье приводятся результаты среднемасштабного исследования и картографирования средообразующих функций лесов в пределах выбранных эталонных ландшафтов, которые расположены в различных физико-географических районах Московской области: Верхневолжской низменности, южного макросклона Клинско-Дмитровской гряды, Теплостанской возвышенности и Мещерской низменности. По карте растительности Московской области для каждого ландшафта определено разнообразие лесов, по космическим снимкам системы Landsat разных лет выявлена динамика и рассчитан вегетационный индекс для каждой лесной ассоциации. Для некоторых типов леса сведения о составе и структуре которых имеются в литературных источниках, рассчитано продуцирование кислорода и депонирование углерода фитомассой на площади с 1 га. Источниками информации для этого выступили полевые исследования автора, кафедры биогеографии географического факультета МГУ, ЦЭПЛИ РАН, а также литературные источники. При помощи методов математической статистики и значений вегетационного индекса предложена методика расчета средообразующих функций для каждого контура лесов эталонных ландшафтов. Это позволило дать картографическую оценку вклада основных древесных пород в средообразующую функцию леса. Наиболее высокие значения продуцирования кислорода присущи пойменным мелколиственным лесам с ольхой серой и черной, лещиной и ивой в составе, а также условно-коренным широколиственным породам. При этом максимальное продуцирование кислорода отмечается в лесах в ландшафтах с низким антропогенным влиянием – Верхневолжской и Мещерской низменностях, минимальное – в антропогенно нарушенных лесах Теплостанской возвышенности. Заболоченный характер местности указанных низменных ландшафтов также определяет относительно высокие значения и депонирования углерода лесами. В работе приведен пример созданных карт оценки средообразующих функций лесов. Полученные результаты могут быть использованы в устойчивом управлении лесами с целью составления рекомендаций сохранения наиболее ценных лесных сообществ в ландшафте. Неучет экологической составляющей приводит к деградации не только лесов, но и экосистемы в целом, что негативно сказывается как на экологической ситуации, так и на здоровье человека.

Ключевые слова: экологические функции лесов, продуцирование кислорода, депонирование углерода, дистанционное зондирование лесов, картография

Введение. В настоящий момент актуальна проблема сохранения лесных массивов, являющихся базовыми ядрами экологического каркаса регионов [Кравченко, 2015]. Московская область характеризуется повышенным антропогенным преобразованием природных экосистем, наиболее уязвимыми при градостроительном развитии оказываются лесные массивы [Васильев, Чистов, 2017; Васильев и др., 2019].

Леса являются природными экосистемами и способны выполнять различные экологические функции. Функция леса, по мнению М.В. Рубцова, это «его специфическое влияние на факторы среды, явления природы и компоненты биосферы, определяющиеся характером взаимодействия с ними свойствами лесных биогеоценозов» [Рубцов, 1984, с. 3]. Принято выделять несколько групп природных экологических функций: средообразующие, защитные и стабилизирующие. Наиболее важными для человека являются средообразующие функции лесного покрова. Леса вносят важный вклад в углеродный

баланс и регуляцию глобальных климатических изменений [Woodward et al., 1995; Schimal et al., 2001; Замолотчиков, 2011 и др.]. Однако оценки этого вклада носят глобальный и крупнорегиональный характер и не учитывают пространственную структуру и разнообразие реакций лесных сообществ. Проблема разработки ландшафтно-экологического подхода посвящено значительно меньше работ, основная часть из которых выполнена российскими специалистами [Зимин, 2009; Коломыц и др., 2009].

Вопросам оценки важнейших экологических функций растительного покрова уделяется определенное внимание, но остается актуальной задача оценки и создания соответствующих эколого-географических карт [Васильев, Чистов, 2016; Зимин, 2009]. Целью настоящей работы является сравнительно-картографическая оценка средообразующих функций, выполняемых лесными сообществами в пределах эталонных ландшафтов Московской области.

Материалы и методы исследования. В качестве эталонных территорий выбраны четыре ланд-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; e-mail: vasilyev_vizin@bk.ru

² ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», отдел прикладных морских и водохозяйственных исследований и изысканий, мл. науч. с.

шафта моренного, моренно-водноледникового и водноледникового генезисов, которые расположены в различных природных провинциях Московской области: Верхневолжской низменности, южном макросклоне Клинско-Дмитровской гряды, Теплостанской возвышенности и Мещерской низменности. Природная структура самих ландшафтов (генезис, климатические и прочие особенности), а также антропогенное влияние существенно различаются пространственным соотношением лесов различных формаций и тенденциями трансформации лесного покрова [Васильев и др., 2019].

В пределах Верхневолжской низменности был выбран наиболее типичный Ермолинский ландшафт, в Мещерской низменности в качестве эталонного выбран относительно малоосвоенный Лузгаринский ландшафт, в Клинско-Дмитровской гряде – Истринский ландшафт, а на Теплостанской возвышенности – Апрельско-Кунцевский [Анненская и др., 1997].

В качестве метода исследования был выбран картографический, который позволяет проводить не только пространственное сравнение, но и оценку изменения динамики средообразования. Основным картографическим источником послужила карта растительности Московской области (1996 г., растительный покров дан по состоянию на 1991 г). На ней в рамках концепции эпитаксонов показаны условно-коренные, короткопроизводные и длительнопроизводные лесные сообщества [Огуреева и др., 1996].

Общий алгоритм исследования приведен на рис. 1. В первой его части проведено определение параметров средообразования лесов, исходными данными при этом послужили литературные источники и полевые исследования автора. Вторая часть основана на использовании материалов космической съемки – Landsat 5 (сентябрь 2006 г.) и Landsat 8 (сентябрь 2014 и 2016 гг.). Для их совместного анализа выполнена радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция космических снимков. Пос-

ле этого проведена классификация лесов по их спектральной яркости, результаты которой при необходимости редактировались путем визуального дешифрирования.

Автором были апробированы снимки, сделанные в разные сезоны года (с июня по сентябрь), в результате чего на основе качества отснятого материала (на все эталонные ландшафты) и анализа результатов тематической обработки (величина соотношения вегетационного индекса для разных месяцев в пределах ландшафта практически одинакова) были выбраны снимки за сентябрь, для которых также характерна и определенная форма крон деревьев, сформировавшихся за вегетационный период климатического года. Для учета фазы вегетации древесных пород были использованы литературные источники и проведена аналогичная работа по космическим снимкам июля и августа. Форма крон деревьев разного вида является одним из признаков для дешифрирования на снимках породного состава древостоя.

Основой оценки экологических функций лесов являются их средообразующие способности – объем продуцирования кислорода и депонирования углерода [Васильев, Чистов, 2016]. В целом, оценке средообразующих функций лесов посвящено достаточно много работ. Одна из наиболее полных – монография Н.И. Базилевич [1993]. Настоящее исследование при оценке объемов продуцирования кислорода по первичной продукции дерева ориентировано на методическое обобщение, предложенное в работе [Варфоломеев, МIRONENKO, 2012]. Расчет депонируемого им углерода основан на определении прироста фитомассы по методу, изложенному в работе [Уткин и др., 2003]. При этом данные первичной биологической продукции являются прямой функцией продуцирования кислорода.

Определение депонирования углерода фитомассой дерева построено на конверсионно-объемной

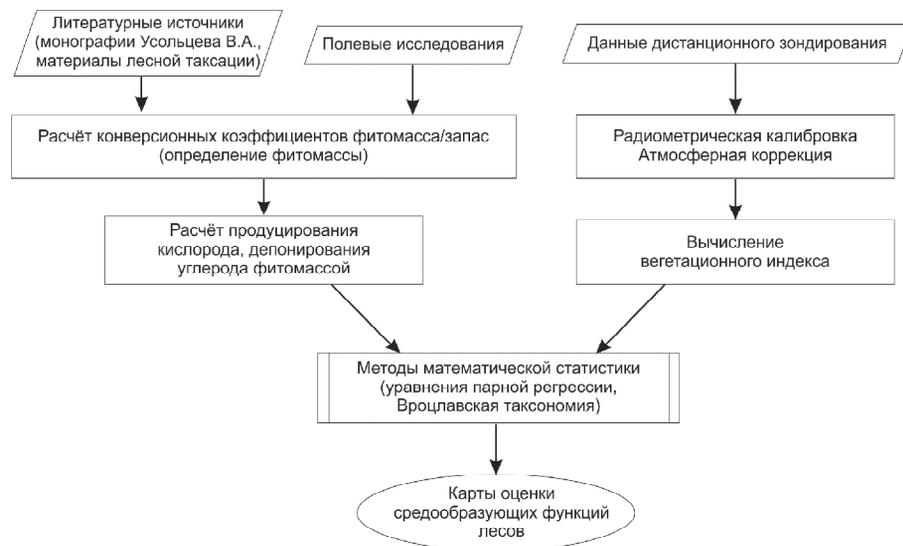


Рис. 1. Общий алгоритм исследования

Fig. 1. General scheme of the study

методике для оценки запасов углерода в лесных насаждениях, по которым оценивают годовое депонирование углерода лесами. Метод основан на конверсии объемных запасов насаждений в фитомассу и далее в углерод [Уткин и др., 2003].

В качестве источников информации о первичной продукции лесов целесообразно использовать материалы полевых исследований или крупномасштабной лесной таксации (лесоустройства). В исследовании были использованы имеющиеся в фондах кафедры биогеографии географического факультета МГУ крупномасштабные (1:25 000) материалы лесной таксации прошлых лет на части эталонных ландшафтов (ввиду недоступности подобных данных), результаты полевых исследований, а также монографии [Усольцев, 2010; Усольцев, 2016], содержащие сведения о биологической продуктивности основных лесобразующих пород. Исходные материалы были увязаны в единой координатной основе и наложены на среднемасштабную карту растительности для локализации точек исходных данных в конкретных эписоциациях.

Отметим, что проводимые по упомянутым методикам оценки позволяют представить продукционные процессы конкретных древесных видов и будут справедливы, строго говоря, лишь для монодоминантных сообществ. Рассматриваемая в настоящем исследовании в качестве единицы картографирования лесная эписоциация представляет собой определенный комплекс растительных сообществ с разным составом пород и внутренней структуры. Расчет искомым функций в пределах лесных сообществ производился как средневзвешенное значение для отдельных пород деревьев с учетом формулы древостоя.

В связи с этим, относительно точный расчет был возможен для тех сообществ, сведения о составе, структуре и первичной продукции которых имеются в литературе. Однако некоторая часть лесов не обеспечена ни литературными, ни полевыми данными. Но поскольку в исследовании ставилась задача сравнительного анализа эталонных ландшафтов в целом, возникла необходимость разработки методики определения искомым величин на основе использования цифровых космических снимков. За основу расчетов были взяты следующие положения.

Известно, что многозональные космические снимки позволяют с некоторыми допущениями определять на основе вегетационных индексов продукционные особенности различных типов как естественной, так и сельскохозяйственной растительности [Кронберг, 1998]. Вегетационный индекс суммирует и отражает влияние многих факторов; его значение отображает в целом интенсивность процесса фотосинтеза – продуцирования кислорода и депонирования фитомассой углерода. В данном исследовании был использован простой разностный вегетационный индекс (т. н. Difference VI, DVI), который определяется как разность между яркостями в ближней инфракрасной и красной зонах спектра. Таким образом, зная усредненное значение ве-

гетационного индекса в пределах лесных сообществ, выделенных на карте растительности и актуализированных по космическим снимкам, можно сделать вывод об эффективности процесса фотосинтеза в лесах эталонных ландшафтов.

Для расчета вегетационного индекса в каждом контуре растительных сообществ были собраны эталонные значения яркости, определяемые верхним ярусом древесных пород. Для этого использовались материалы «Tree canopy cover for year 2000» портала Global forest watch, создаваемого в рамках глобального проекта Global forest change, которые косвенно отражают сомкнутость крон (в каждом пикселе изображения с разрешением 30 м отображается процент древесного покрова на данной территории, от 0 до 100%) [Hansen et al., 2013].

Это позволило на качественном и количественном уровнях сравнить значения вегетационного индекса в разных по своему составу лесных сообществах, осредняя параметры средообразования, и дало возможность отработать методику оценки продуцирования кислорода и депонирования углерода фитомассой лесов с отсутствующими исходными данными для более точного расчета. Таким образом, данная методика позволяет получить необходимые в целях картографирования материалы.

Отметим, все упомянутые операции были проведены для каждого эталонного ландшафта с целью дальнейшего сравнительного анализа, в рамках данной работы приведем основные результаты исследования на примере одного Лузгаринского ландшафта Мещерской низменности, ввиду относительно низкого нарушения его лесного покрова.

Результаты и их обсуждение. По значениям вегетационного индекса строились диаграммы от минимального значения до максимального. По анализу диаграмм для каждого эталонного ландшафта было выделено 5 комплексов леса (от А до Д), которые резко отличаются друг от друга по своим средообразующим способностям, где комплекс А имеет минимальный вегетационный индекс (средообразующие способности лесов минимальны), комплекс Д – максимальный. Минимальный вегетационный индекс характерен в основном для длительнопроизводных сообществ с преобладанием мелколиственных пород или старовозрастных короткопроизводных лесов с преобладанием ели. В Лузгаринском ландшафте (рис. 2) это березово-сосновые леса с елью. Максимальный же вегетационный индекс в основном у короткопроизводных или условно-коренных сообществ; в Лузгаринском ландшафте – пушистоберезовые с сосной и ольхой серой, а также осиново-сосново-еловые леса.

По значениям вегетационного индекса, определенным для каждого лесного сообщества в Лузгаринском ландшафте и вычисленным по исходным данным величины продуцирования кислорода и депонирования углерода фитомассой лесов, были построены графики их соответствия с ежегодной продукцией ландшафта (см. рис. 2). Эти материалы послужили основой последующих расчетов уравне-

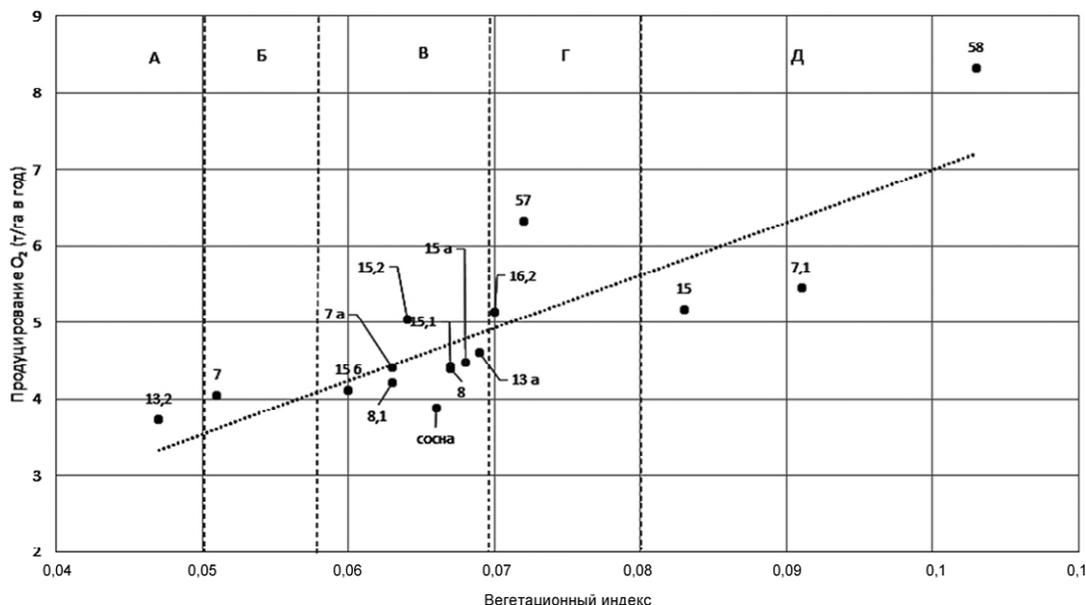


Рис. 2. Диаграмма рассеяния (поле корреляции) и комплексы лесов по вегетационному индексу (Лузгаринский ландшафт)

Fig. 2. The scattering diagram (correlation field) and forest complexes according to the vegetation index (Luzgarinskij landscape)

ний регрессии линейного типа с целью определения неизвестных характеристик средообразующих функций некоторых лесов, проведенных в программном продукте Statistica base. К примеру, уравнение регрессии связи продуцирования кислорода и вегетационного индекса для Лузгаринского ландшафта Мещерской низменности (см. рис. 2) имеет следующий вид:

$$y = 68,859x + 0,115, \quad (1)$$

где y – величина продуцирования кислорода, x – значение вегетационного индекса, определенное по космическим снимкам системы Landsat.

Дополнительно оценивалось качество уравнений регрессии, средняя ошибка аппроксимации и соответствие критерию Дарбина-Уотсона. Для всех эталонных ландшафтов качество уравнения регрессии достаточно высокое, однако в Истринском и Лузгаринском ландшафтах эта связь выражена ярче (табл. 1).

Связь между показателями, величину которой отражает коэффициент корреляции, для всех эталонных ландшафтов прямая и высокая, чуть меньше – в Апрелевско-Кунцевском ландшафте. Для него же характерно в целом низкое значение коэффициента детерминации, который показывает с какой долей (вероятностью) результат определяется показате-

лем. В нашем случае в Апрелевско-Кунцевском ландшафте продуцирование кислорода только на 64% зависит от вегетационного индекса и, наоборот, остальные 36% объясняются не учтенными в модели факторами – это могут быть и экологическое состояние, и возрастные особенности и другие причины. Однако средняя ошибка для данной модели составляет 7%, что говорит о достаточно хорошем подборе уравнения регрессии.

Безусловно, полученные сведения не учитывают влияние на продукционные способности лесов возраста и экологических особенностей насаждений, прежде всего ввиду недоступности подобных сведений. Однако полученные уравнения позволяют определять наиболее вероятные величины продуцирования кислорода в отсутствии точных данных. Ошибка, возникающая при таких расчетах, не является статистически значимой для целей среднемасштабной оценки и верификации используемой методики. При наличии более подробных сведений для всех эталонных ландшафтов подобные расчеты могут проводиться отдельно для различных возрастных групп лесов.

Разделение лесов ландшафта на группы средообразования на основании одного вегетационного индекса не является оптимальным. В связи с этим была разработана методика, которая бы учитыва-

Таблица 1

Показатели качества уравнений регрессии

Ландшафт	Коэффициент парной корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации (%)
Ермолинский	0,83	0,69	12,82
Истринский	0,88	0,77	5,79
Апрелевско-Кунцевский	0,80	0,64	7,02
Лузгаринский	0,84	0,71	9,45

ла как вегетационный индекс, так и продукционные способности лесов. В данной работе в основу классификации лесов положен метод Вроцлавской таксономии (см. рис. 1), широко использующийся в математической статистике для разработки классификаций, учитывающих несколько факторов. Разработанная классификация лесов основана на группировке лесных сообществ на основе подобия их внутренней структуры, представленной в данном случае посредством двух показателей. Результат такой классификации изображен на рис. 3. В предложенной таблице строки характеризуют интервалы вегетационного индекса по выделенным комплексам, столбцы – результат выделения аналогичных интервалов по продуцированию кислорода. В ячейках представлена оценка средообразования (номера групп) лесных сообществ по карте растительности, которые отражены интенсивностью цвета.

С учетом доли каждой эписоциации в эталонных ландшафтах произведены расчеты суммарных

показателей выделенных групп лесов, которые наглядно характеризуют различия в продукционных способностях сообществ эталонных ландшафтов, представленных в табл. 2 (продуцирование кислорода) и табл. 3 (депонирование углерода). В таблицах в числителе приведены интервалы соответствующих величин, а в знаменателе – их средневзвешенное значение соответственно.

По продуцированию кислорода минимальное значение характерно для старовозрастных березово-осиново-еловых с сосной лесов, в то время как максимальные значения характерны для условно-коренных широколиственных лесов. Полученные результаты хорошо соотносятся с аналогичными выводами других исследований [Базилевич, 1993; Зимин, 2009 и др.]. Так, молодые насаждения на уровне ландшафта аккумулируют углерод и увеличивают его запас, а преобладание спелых и перестойных насаждений в ландшафте снижает запас углерода [Bottcher et al., 2008]. По накоплению уг-

	A	B	C	D	E	F
1	Вегетационный индекс	Продуцирование кислорода				
2		Менее 4	от 4 до 4,3	от 4,3 до 4,9	от 4,9 до 6	более 6
3	менее 0,05	I	II	III	IV б	V б
4	от 0,05 до 0,055					
5	от 0,055 до 0,069					
6	от 0,069 до 0,08			IV а		
7	более 0,08				V а	

Рис. 3. Выделение групп лесов по значениям вегетационного индекса и продуцирования кислорода (Лузгаринский ландшафт). Латинскими цифрами отмечены выделенные группы лесов

Fig. 3. Groups of forests according to the vegetation index and oxygen production values (Luzgarinskij landscape). The groups of forests are marked with Latin numbers

Таблица 2

Продуцирование кислорода по группам лесов (т/га в год)

Оценка продуцирования (в группе лесов)	Эталонный ландшафт Московской области			
	Ермолинский	Истринский	Апрелевско-Кунцевский	Лузгаринский
I	<u>2,45 – 3,4</u>	<u>3,88 – 4,01</u>	<u>3,34 – 3,70</u>	<u>3,73 – 3,88</u>
	3,31	3,95	3,53	3,75
II	<u>3,59 – 4,01</u>	<u>4,01 – 4,54</u>	<u>3,81 – 4,20</u>	<u>4,04 – 4,21</u>
	3,78	4,21	4,00	4,19
III	<u>3,60 – 4,20</u>	<u>4,66 – 4,75</u>	<u>4,35 – 4,79</u>	<u>4,41 – 4,48</u>
	3,94	4,73	4,45	4,44
IV	<u>4,3 – 4,72</u>	<u>4,85 – 5,5</u>	<u>4,36 – 5,17</u>	<u>4,61 – 5,17</u>
	4,50	4,96	4,79	4,87
V	<u>5,04 – 7,63</u>	<u>5,22 – 6,74</u>	<u>5,45 – 6,78</u>	<u>5,45 – 8,32</u>
	6,41	5,50	6,26	6,39
Средневзвешенное по ландшафту	4,32	4,43	4,60	4,34

Таблица 3

Деponирование углерода фитомассой в группах лесов (т/га в год)

Оценка деponирования (в группе лесов)	Эталонный ландшафт Московской области			
	Ермолинский	Истринский	Апрелевско-Кунцевский	Лузгаринский
I	<u>0,90 – 1,28</u>	<u>1,44 – 1,51</u>	<u>1,20 – 1,40</u>	<u>1,39 – 1,55</u>
	1,24	1,48	1,32	1,41
II	<u>1,34 – 1,50</u>	<u>1,50 – 1,70</u>	<u>1,40 – 1,5,8</u>	<u>1,51 – 1,58</u>
	1,42	1,58	1,50	1,57
III	<u>1,35 – 1,57</u>	<u>1,75 – 1,80</u>	<u>1,63 – 1,80</u>	<u>1,65 – 1,68</u>
	1,48	1,86	1,67	1,66
IV	<u>1,60 – 1,80</u>	<u>1,80 – 2,1</u>	<u>1,63 – 2,00</u>	<u>1,70 – 1,95</u>
	1,68	1,86	1,80	1,83
V	<u>1,89 – 2,90</u>	<u>1,90 – 2,60</u>	<u>2,04 – 2,55</u>	<u>2,00 – 3,20</u>
	2,40	2,06	2,35	2,40
Средневзвешенное по ландшафту	1,62	1,68	1,72	1,62

лерода стоит выделить леса Мещерской низменности, являющиеся его важным пулом в пределах Московской области. Однако площадь лесов со значительными объемами депо углерода в рассмотренном ландшафте невелика, в связи с этим их вклад в средневзвешенное по ландшафту значение ограничен.

В Лузгаринском ландшафте в лесах V группы (условно-коренные широколиственные и короткопроизводные леса) продуцирование кислорода достигает 8,32 т/га в год, а деponирование углерода – 3,2 т/га в год.

В IV группе (в основном условно-коренные сосново-еловые леса) продуцирование кислорода достигает чуть более 5 т/га в год (средневзвешенное 4,87 т/га в год), среднее деponирование углерода – чуть менее 2 т/га в год, а вегетационный индекс – от 0,055 до 0,08.

III группа (короткопроизводные мелколиственные и хвойные леса) по продуцированию кислорода не выделяется (максимально 4,5 т/га в год), деponирование углерода также среднее (не более 1,7 т/га в год), вегетационный индекс не превышает 0,069.

Во II группе (коротко- и длительнопроизводные мелколиственные и хвойные леса) продуцирование кислорода не превышает 4,21 т/га в год, а вегетационный индекс меньше 0,069.

Леса I группы меньше всего продуцируют кислород (меньше 4 т/га в год) и деponируют углерод (меньше 1,55 т/га в год). Сюда входят короткопроизводные березово-сосновые с елью леса и старовозрастные посадки сосны.

Отметим, что выделенные в итоге группы лесов согласуются с их геоботаническим разделением: в ландшафте почти полностью представлен ряд сосново-еловых вейниково-черничных лесов (эпиассоциации 13 и 15; здесь и далее номера эпиассоциаций даны в соответствии с картой растительности МО). Относительно высокий среднеобразую-

щий потенциал имеют условно-коренные и короткопроизводные леса, слабый среднеобразующий – длительнопроизводные сообщества: 15–15,2–15,1–15а–15б и 13–13а–13,2 (старовозрастные сосново-еловые леса), при этом средневзвешенная величина продуцирования кислорода и деponирования углерода в ряду эпиассоциации 15 несколько выше соответствующих значений ряда эпиассоциации 13, что может свидетельствовать о более угнетенном и старовозрастном составе данных лесов.

Подобное выделение групп легло в основу построения легенд карт оценок среднеобразующих функций лесов на эталонные ландшафты (рис. 4). Легенды представляют собой матричную форму, где, с одной стороны отмечены количественные характеристики среднеобразования, с другой дана качественная оценка среднеобразующего потенциала. Как можно заметить, среднеобразующий потенциал тем больше, чем выше величина продуцирования кислорода и деponирования углерода. Карты позволяют наглядно оценить среднеобразующий эффект лесных сообществ и выделить, прежде всего, наиболее ценные из них, для которых (при условии выполнения других экологических функций) целесообразно предложение мер охраны как важнейших ядер экологического каркаса территории.

Подобная работа была проведена для всех четырех эталонных ландшафтов Московской области. Разработанные в результате этого карты оценки среднеобразующих функций лесов полностью раскрывают их среднеобразующие процессы. Карт на подобную тематику среди зарубежных работ немного. Пожалуй, следует особо выделить работу Европейской комиссии по картографированию экосистемных услуг (Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services – MAES). Полная методологическая основа картографирования экосистемных услуг (функций) разработана в [Burkhard, Maes, 2017].

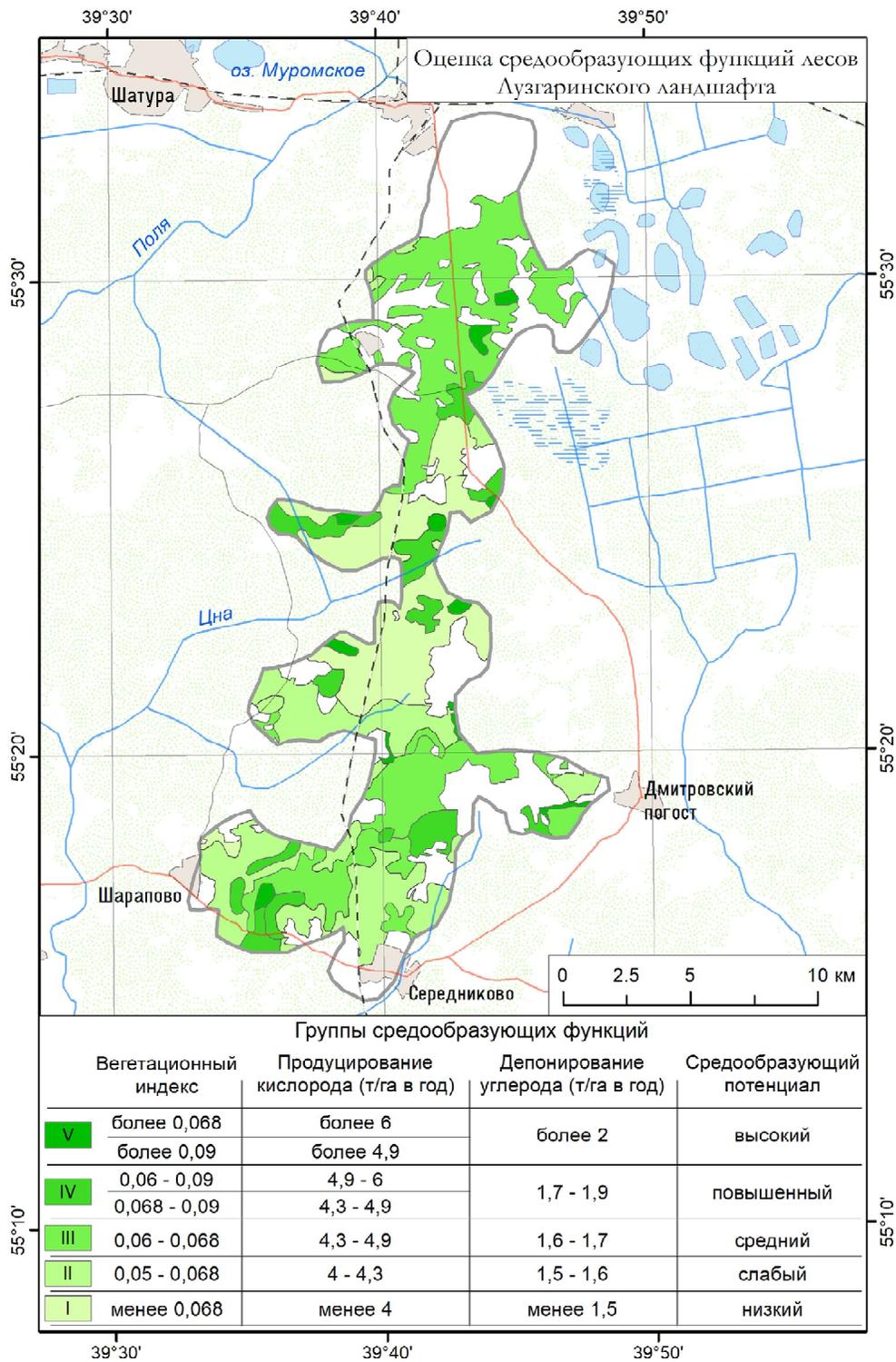


Рис. 4. Фрагмент карты оценки средообразующих функций лесов (Лузгаринский ландшафт)

Fig. 4. The fragment of the map of the assessment of environmental-forming functions of forest (Luzgarinskij landscape)

На основе данных карт стал возможным качественный и количественный анализ параметров средообразования каждого лесного контура эписоциаций (взятого с рассмотренной карты растительности Московской области), а также мест произрастания наиболее ценных лесов ландшафта. Так, на рис. 5 приведены диаграммы, наглядно характе-

ризующие соотношение лесов разных групп и средообразующую ценность ландшафта в целом. В таблице 4 приведены количественные доли лесов разных групп в ландшафтах.

В Истринском ландшафте (см. рис. 5Б) ярко преобладают леса слабого средообразующего потенциала (II группы), при этом максимальная ве-

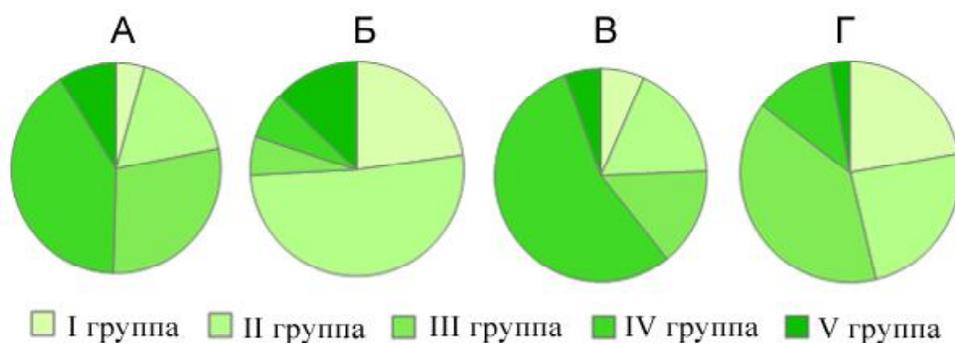


Рис. 5. Продукционные способности лесов эталонных ландшафтов: А – Ермолинский; Б – Истринский; В – Апрелевско-Кунцевский; Г – Лузгаринский

Fig. 5. The production functions of forests in the reference landscapes: А – Ermolinskij; Б – Istrinskij; В – Aprelevsko-Kuntsevskij; Г – Luzgarinskij

Таблица 4

Соотношение лесов разных групп в эталонных ландшафтах

Эталонный ландшафт	Группы лесов (% от общей площади лесов)				
	I	II	III	IV	V
Ермолинский	4,40	17,53	28,51	40,63	8,93
Истринский	22,78	51,37	5,89	6,92	13,04
Апрелевско-Кунцевский	6,65	17,68	14,98	55,20	5,49
Лузгаринский	22,21	24,04	39,07	11,67	3,01

личина продуцирования кислорода составляет 6,74 т/га в год. По породному составу высокие продукционные способности имеют еловые, сосново-еловые, елово-дубовые сообщества, произрастающие в основном к северо-западу от Истры и юго-западу от Истринского водохранилища. Минимальные показатели средообразования у березово-сосновых с елью, березово-еловых с сосной лесов, посадок сосны, произрастающих в южной и северо-восточной частях ландшафта.

В Апрелевско-Кунцевском ландшафте наиболее значительные площади лесов повышенного средообразующего потенциала (см. рис. 5В), максимальная величина продуцирования кислорода, как и в предыдущем случае, не превышает 6,78 т/га в год. Высокие параметры средообразования характерны для короткопроизводных дубовых, липово-дубовых с березой, осинной, сосной и елью лесов. Такие леса произрастают в основном к северу от города Одинцово, а также в Вороновском поселении присоединенных территорий Москвы. В целом, как показало аналогичное исследование на присоединенных территориях Москвы, леса Роговского и Вороновского поселений имеют высокое значение средоэкологического потенциала, а данные муниципальные образования – благоприятную экологическую обстановку [Васильев, Чистов, 2016]. Минимальные продукционные способности у березовых с елью, ольхой и рябиной сообществ, а также условно-коренных черноольховых с черемухой ивняковых лесов, окружающих крупные населенные пункты и произрастающих в центральной части ландшафта.

В Ермолинском ландшафте (см. рис. 5А) примерно равные доли занимают леса II и III групп, при преобладании длительнопроизводных лесов максимальное значение продуцирования кислорода менее 7,7 т/га в год. Наиболее продуктивные – осиново-березово-сероольховые, березовые с елью и сосной, а также условно-коренные пушистоберезовые с ольхой черной леса, которые произрастают к северо-востоку от Талдома, а также в самой восточной части ландшафта. Леса, произрастающие в восточной и северной частях ландшафта, в основном переувлажнены, и для них характерны высокие значения депонирования углерода. К низкопродуктивным относятся бореальные березово-осиново-еловые с сосной, сосновые сообщества, произрастающие в центральной части ландшафта в окрестностях деревни Ермолино.

В Лузгаринском ландшафте (см. рис. 4; рис. 5Г) преобладают условно-коренные старовозрастные леса, высокие показатели средообразования (до 8,32 т/га в год) характерны для условно-коренных лесов: черноольховых с черемухой ивняковых, пушистоберезовых с сосной и ольхой серой, а также короткопроизводных бореальных осиново-березово-сосново-еловых лесов, произрастающих по большей части в северной и отчасти центральной частях ландшафта. Минимальная средообразующая способность у березово-сосновых с елью лесов, а также посадок сосны в центральной части ландшафта.

Таким образом, преобладание в ландшафтах условно-коренных и короткопроизводных лесов характеризует в целом стабильный с экологической

точки зрения ландшафт и относительно высокие продукционные способности лесов (например, Лузгаринский ландшафт), при преобладании же длительнопроизводных мелколиственных лесов продуцирование кислорода и депонирование углерода фитомассой имеют меньшие значения, однако именно в них являются наиболее ценными сохранившиеся ареалы короткопроизводных сообществ, имеющие больший вегетационный индекс и характеристики средообразования (к примеру, Апрельско-Кунцевский ландшафт). Также на средообразующие функции влияют как породный, так и возрастной состав лесов. Продуцирование кислорода, как и способность депонировать углерод, в таких лесах падает, в то время как в лесах среднего возраста она возрастает.

Выводы:

– в лесах рассмотренных ландшафтов Московской области существенны различия как в процентном соотношении лесных сообществ, так и в направлении трансформации лесных экосистем, которые выполняют различные экологические функции. Наиболее ярко охарактеризованные различия проявляются в оценке средообразующих функций лесов;

– использование сентябрьских космических снимков в предложенной методике автора позволило рассчитать вегетационные индексы для каждого лесного контура в пределах эталонных ландшафтов, тем самым косвенно оценив средообразующие функции лесов. Условно-коренные лесные сообщества имеют, как правило, более высокий вегетационный индекс, для длительнопроизводных нарушенных лесов он будет более низким. Так, в среднем вегетационный индекс лесов Лузгаринского ландшафта выше Апрельско-Кунцевского;

– основываясь на функциональной зависимости между продуцированием кислорода и вегетационны-

ми индексами, для всех лесов эталонных ландшафтов были рассчитаны интересующие величины средообразования. При помощи методов математической статистики были выделены пять групп средообразования лесов, на основе которых составлены легенды карт оценки средообразующих функций лесов эталонных ландшафтов по упомянутой методике. Эти карты, составленные в масштабе 1:200 000, являются первым подобным картографическим произведением на рассматриваемую территорию, имеют единую компоновку и элементы;

– относительно высокое максимальное продуцирование кислорода отмечается в лесах ландшафтов с низким антропогенным влиянием – Лузгаринском (Мещерская низменность) и Ермолинском (Верхневолжская низменность). Заболоченный характер местности указанных ландшафтов также определяет относительно высокие значения запасов и депонирования углерода лесами (ввиду их малой площади средневзвешенное значение получается ниже, чем в других ландшафтах). Несмотря на скудность видового состава, в Лузгаринском ландшафте леса выполняют важную средообразующую роль, как и некоторые лесные сообщества Апрельско-Кунцевского ландшафта, которые следует рекомендовать к охране;

– на основе составленных карт, демонстрирующих результат оценки средообразующих функций лесов эталонных ландшафтов, возможна реализация исследования с целью картографирования средообразующих функций лесов на иные территории – как ландшафты, так и регион в целом. Это позволит сохранить важнейшие ядра экологического каркаса Московской области в интересах будущих поколений и устойчивого развития территории столичного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: СГУ, 1997. 296 с.
- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Варфоломеев А.Ю., Мироненко А.А. Влияние накопления биологических повреждений на выделение кислорода хвойными насаждениями на севере // Фундаментальные исследования. 2012. № 9. С. 361–368.
- Васильев О.Д., Чистов С.В. Исследование и картографирование средообразующих функций лесов Новой Москвы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60. № 5. С. 128–133.
- Васильев О.Д., Чистов С.В. Экологический каркас Московского региона и его сохранение // Геопоиск-2017: Материалы II Всероссийского конгресса молодых ученых-географов. Тверь: Изд-во ТвГУ, 2017. С. 338–354.
- Васильев О.Д., Огуреева Г.Н., Чистов С.В. Оценка ценотического разнообразия лесного покрова и его динамики в эталонных ландшафтах Московского региона по данным дистанционного зондирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. Т. 64(2). С. 185–205. DOI: 10.21638/spbu07.2019.202.
- Замолодчиков Д.Г. Система оценки и прогнозов запаса углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4(29). С. 15–22.
- Зимин М.В. Разработка методики картографирования средообразующих функций бореальных лесов европейской России: дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2009. 157 с.
- Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Шарая Л.С. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. 2009. № 6. С. 403–409.
- Кравченко П.Н. Экологическая оценка территории Тверской области в интересах сохранения редких видов *in situ* на основе каркасно-геоэкологического моделирования: дис. ... канд. геогр. наук. Тверь, 2015. 181 с.
- Кронберг П. Дистанционное изучение Земли / Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
- Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Суслова Е.Г., Швергунов Л.В. Растительность Московской области. Пояснительный текст к карте (м-б 1:200 000). М.: Экор, 1996. 45 с.

Рубцов М.В. Классификация функций и роли леса // Лесоведение. 1984. № 2. С. 3–10.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский госуд. лесотехн. ун-т, 2016. 335 с.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.

Bottcher H., Kurz W.A., Freibauer A. Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol – factoring out past disturbance and management effects on age-class structure. *Environ. Sci. Policy*, 2008, no. 11, p. 669–686.

Burkhard B., Maes J. Mapping Ecosystem Services. Sofia: Pensoft Publishers. 2017, 374 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher R., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, issue 6160, p. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693. URL: <https://science.sciencemag.org/content/342/6160/850>.

Schimal D.S., House J.L., Hibbard K.A. et al. Reset patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, vol. 414, no. 8, p. 169–178. DOI: 10.1038/35102500.

Woodward F.I., Smith T.M., Emanuel V.R. A global and primary productivity and phytogeography model. *Global biogeochemical cycles*, 1995, vol. 9, iss. 4, p. 471–490. DOI: 10.1029/95GB02432.

Поступила в редакцию 29.01.2020

После доработки 12.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

O.D. Vasilyev¹

MAPPING OF ENVIRONMENT-FORMING FUNCTIONS OF FORESTS AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS IN THE LANDSCAPES OF THE MOSCOW REGION

The article presents the results of a medium-scale study and mapping of the environment-forming functions of forests in the reference landscapes located in various physical and geographical areas of the Moscow region, namely the Verkhnevolzhskaya Lowland, the Klinsko-Dmitrovskaya range, the Teplostanskaya Upland and the Meshcherskaya Lowland. The actual forest diversity was determined for each landscape from the vegetation map; the dynamics of each forest epi-association was identified, and the vegetation index was calculated using the Landsat space imagery. The production of oxygen and the carbon sequestration by phytomass are calculated for 1 ha of some types of forests, the composition and structure of which are covered in available publications. The sources of information are field studies by the author, the Department of Biogeography of the MSU Faculty of Geography, the Center of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, and literary sources. Using methods of mathematical statistics and values of the vegetation index, a method for calculating the environment-forming functions for each forest area of reference landscapes is proposed. This made it possible to give a cartographic assessment of the contribution of main tree species to the environment-forming functions of forests. The highest values of oxygen production are characteristic of floodplain forests with gray and black alder, hazel and willow, as well as for nominally primary broad-leaved species. The maximum production of oxygen is observed in the landscapes with low anthropogenic impact, i. e. the Verkhnevolzhskaya and Meshcherskaya lowlands, the minimum production – in the anthropogenically disturbed forests of the Teplostanskaya Upland. And, the swampy terrain of the low-lying landscapes determines relatively high values of carbon sequestration by forests. The paper gives examples of the evaluation maps of environment-forming functions of forests. The results can be used for sustainable forest management with the aim of recommending the conservation measures for the most valuable forest communities in a landscape. Disregard of the environmental component leads to the degradation of both forests and the whole ecosystem, thus affecting the ecological situation and the human health.

Key words: ecological functions of forests, oxygen production, carbon sequestration, remote sensing of forests, cartography

REFERENCES

Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Kalinina V.R., Mamai I.I., Nizovtsev V.A., Khrustaleva M.A. Tsesel'chuk Yu.N. Landshafty Moskovskoi oblasti i ikh sovremennoe sostoyanie [Landscapes of the Moscow region and their current state]. Smolensk, SGU Publ., 1997, 296 p. (In Russian)

Bazilevich N.I. Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii [Biological productivity of Northern Eurasia ecosystems], Moscow, Nauka Publ., 1993, 293 p. (In Russian)

Bottcher H., Kurz W.A., Freibauer A. Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol – factoring

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, post-graduate student; Zubov State Oceanographic Institute, Department of Applied Sea and Water Economy Research and Surveying, Junior Scientific Researcher; e-mail: vasilyev_vizin@bk.ru

out past disturbance and management effects on age-class structure. *Environ. Sci. Policy*, 2008, no. 11, p. 669–686.

Burkhard B., Maes J. *Mapping Ecosystem Services*. Sofia, Pensoft Publishers, 2017, 374 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher R. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 15 Nov 2013, vol. 342, iss. 6160, p. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693. URL: <https://science.sciencemag.org/content/342/6160/850>

Kolomyts E.G., Rozenberg G.S., Sharaya L.S. Metody landshaftnoi ekologii v prognozykh otsenkakh bioticheskoi regulyatsii uglerodnogo tsikla pri global'nom poteplenii [Landscape ecology methods in predictive estimates of the biotic regulation of the carbon cycle during the global warming]. *Ekologiya*, 2009, no. 6, p. 403–409. (In Russian)

Kravchenko P.N. *Ekologicheskaya otsenka territorii Tverskoi oblasti v interesakh sokhraneniya redkikh vidov in situ na osnove karkasno-geoekologicheskogo modelirovaniya* [Ecological assessment of the Tver region for *in-situ* conservation of rare species based on the network-geocological modeling], PhD dissertation, Tver, 2015, 181 p. (In Russian)

Kronberg P. *Distantionnoe izuchenie Zemli* [Remote sensing of the Earth]. Moscow, Mir Publ., 1998, 343 p. (In Russian)

Kronberg P. *Fernerkundung der Erde: Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Stuttgart, Enke, 1985, 394 p.

Ogureeva G.N., Miklyaeva I.M., Suslova E.G., Shvergunova L.V. *Rastitel'nost' Moskovskoi oblasti. Poyasnitel'nyi tekst k karte (m-b 1:200 000)* [Vegetation of the Moscow region. Explanatory text to the map (scale 1:200 000)]. Moscow, Ekor Publ., 1996, 45 p. (In Russian)

Rubtsov M.V. Klassifikatsiya funktsij i roli lesa [Classification of forest functions and role]. *Lesovedenie*, 1984, no. 2, p. 3–10. (In Russian)

Schimal D.S., House, J.L., Hibbard K.A. et al. Reset patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, vol. 414, no. 8, p. 169–178. DOI: 10.1038/35102500.

Usoltsev V.A. *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* [Biomass and primary production of Eurasia's forests]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2010, 570 p. (In Russian)

Usoltsev V.A. *Fitomassa model'nykh derev'ev lesoobrazuyushchikh porod Evrazii: baza dannykh, klimaticheski obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy* [Single-tree biomass of forest-forming species in Eurasia: database, climate-

related geography, weight tables]. Yekaterinburg, Ural'skii gosud. lesotekhn. universitet, 2016, 335 p. (In Russian)

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A. Metody opredeleniya deponirovaniya ugleroda fitomassy i netto-produktivnosti lesov (na primere Respubliki Belarus') [Methods for evaluation of carbon sequestration in phytomass and net productivity of forests (case study of the Republic of Belarus)]. *Lesovedenie*, 2003, no. 1, p. 48–57. (In Russian)

Varfolomeev A.Y., Mironenko A.A. Vliyanie nakopleniya biologicheskikh povrezhdenii na vydelenie kisloroda khvoynymi nasazhdeniyami na severe [Decrease of oxygen segregation by coniferous stands in case of biological damage accumulation]. *Fundamental research*, 2012, no. 9–2, p. 361–369. (In Russian)

Vasilyev O.D., Chistov S.V. [Ecological framework of Moscow region and its preservation], *Vserossiiskii kongress molodykh uchenykh-geografov Geopoisik-2017* [All-Russian Congress of young geographers «Geopoisik-2017»], Tver, TvGU Publ., 2017, p. 338–354. (In Russian)

Vasilyev O.D., Chistov S.V. Issledovanie i kartografirovaniye sredoobrazuyushchikh funktsii lesov Novoi Moskvy [Researching and creating maps of environmental-forming functions of the forests of New Moscow], *Izvestiya vuzov. Geodezy and aerophotosurveying*, 2016, vol. 60, no. 5, p. 128–133. (In Russian)

Vasilyev O.D., Ogureeva G.N., Chistov S.V. Otsenka tsenoticheskogo raznoobraziya lesnogo pokrova i ego dinamiki v etalonnykh landshaftakh Moskovskogo regiona po dannym distantionnogo zondirovaniya [The assessment of forest cenotic diversity and its dynamics in Moscow region reference landscapes based on remote sensing data], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2019, no. 64(2), p. 185–205. DOI: 10.21638/spbu07.2019.202. (In Russian)

Woodward F.I., Smith T.M., Emanuel V.R. A global and primary productivity and phypogeography model. *Global biogeochemical cycles*, 1995, vol. 9, iss. 4, p. 471–490. DOI: 10.1029/95GB02432.

Zamolodchikov D.G. Sistemy otsenki i prognoza zapasov ugleroda v lesnykh ekosistemakh [The system of evaluation and prediction of carbon stocks in forest ecosystems]. *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2011, no. 4(29), p. 15–22. (In Russian)

Zimin M.V. *Razrabotka metodiki kartografirovaniya sredoobrazuyushchikh funktsij boreal'nykh lesov evropeiskoi Rossii* [Elaboration of a methodology for mapping the environment-forming functions of boreal forests in European Russia]. PhD dissertation. Moscow, 2009, 157 p. (In Russian)

Received 29.01.2020

Revised 12.05.2020

Accepted 06.08.2020