

ЭКОНОМИКА И РЫНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ

УДК 332.142.4

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА
В ЛЕСАХ РОССИИ В 2010-х ГОДАХ

© 2023 г. А. И. Пыжев^{a, b, c, *}

^aСибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

^cИнститут экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Увеличение нетто-поглощения углерода лесами является единственным способом достижения Россией углеродной нейтральности к 2060 г. В этом контексте наряду с мерами по увеличению площадей и качества древостоев важное значение приобретают способы сокращения эмиссии углерода вследствие деятельности человека и природных нарушений. В статье с помощью регрессионных моделей панельных данных анализируется пространственная неоднородность выбросов углерода в лесах России в 2009–2021 гг., измеренных инструментами проекта Global Forest Watch, в зависимости от экономических (объемы лесозаготовки, государственные расходы на проведение лесохозяйственных, лесозащитных и лесопожарных мероприятий) и природных (масштаб лесных пожаров и вспышек массового размножения насекомых-вредителей) факторов. Наибольшее влияние на потери углерода лесами ожидаемо оказывают лесозаготовка и лесные пожары, в то время как расходы на выполнение государственных функций в сфере лесных отношений практически не находят отклика в сокращении углеродных эмиссий. Таким образом, на деле цель по сохранению лесов путем государственных инвестиций в соответствующие мероприятия пока не достигается. Полученный набор регрессионных моделей может быть использован для прогноза динамики региональных эффектов потерь углерода лесами при изменении объемов лесозаготовки и различных траекториях динамики лесопожарной активности. Такой анализ будет критически необходим для формирования региональных планов по сокращению выбросов парниковых газов с учетом максимального использования потенциала наращивания нетто-поглощения углерода лесами.

Ключевые слова: экономика климатических изменений, экономика углеродного регулирования, бюджет углерода лесов, эмиссия углерода, статистическое моделирование, регрессионный анализ панельных данных, Global Forest Watch

DOI: 10.31857/S258755662304009X, **EDN:** CDFDWP

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В рамках Парижского климатического соглашения 2015 г. страны-участницы Рамочной конвенции ООН по изменению климата приняли обязательства по добровольному формулированию национальных целей по сокращению выбросов парниковых газов. В случае большинства развитых стран такие цели подразумевают достижение на определенном горизонте времени так называемой углеродной нейтральности – состояния, когда выбросы парниковых газов полностью компенсируются их поглощением (Rogelj et al., 2021). Несмотря на то, что цели установлены на достаточно длинную перспективу 2050–2060 гг., достижение нулевого углеродного баланса требует политики, направленной как на снижение ан-

тропогенных выбросов, так и на увеличение поглощения углерода природными экосистемами, прежде всего – лесами, которые являются основным естественным поглотителем углерода с депонирующей способностью в 1.1 ± 0.8 Пг углерода в год (Pan et al., 2011). По последним официальным данным¹, углерод-поглощающая способность управляемых лесных экосистем России оценивается в 569.2 млн т CO₂-экв. и условно компенсирует свыше 26% антропогенной эмиссии парниковых газов, что существенно выше, чем для про-

¹ Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1. М., 2022.

чих стран мира (Ваганов и др., 2021). Кроме того, исходные данные Государственного лесного реестра существенно устарели и занижают фактические данные по наличию лесных ресурсов, фактическая оценка поглощающей способности углерода лесами России выше указанной не менее чем на 30% (Filipchuk et al., 2018; Schepaschenko et al., 2021).

Несмотря на существенно усложнившиеся международные отношения, экономика страны находится на пути интеграции в мировую повестку декарбонизации (Порфирьев и др., 2020; Пыжев, 2022). Поскольку потенциал значительного сокращения антропогенных выбросов парниковых газов ограничен высокой долей сырьевых отраслей в структуре промышленного производства, важнейшим ресурсом в этом смысле является именно наращивание поглощающей способности российских лесов (Шварц, Птичников, 2022). Достижение этой цели сталкивается с не самой очевидной проблемой — достаточно высокой интенсивностью потерь углерода российскими лесами, которые возникают в результате растущей интенсивности лесных пожаров, высоких темпов лесозаготовки, активности насекомых-дендрофагов. На отмеченные факторы динамики углеродного бюджета практически не обращают внимание, несмотря на то, что по некоторым оценкам в годы пиков лесопожарной активности российские леса могут становиться не стоком, а чистым источником углерода (Барталев, Стыценко, 2021; Khaik et al., 2021), нивелируя таким образом свой потенциал как важнейшего естественного резервуара по накоплению парниковых газов и, возможно, одного из наиболее ценных экономических активов будущих десятилетий. Таким образом, данная проблема имеет не только научное, но и сугубо практическое значение, которое будет только усиливаться в ближайшие годы².

Снижение темпов обезлесения и изменение возрастной структуры лесных насаждений может внести значительный вклад в смягчение последствий глобального изменения климата. При этом важнейшее значение при управлении бюджетом углерода лесов имеет пространственный аспект, особенно для таких больших по площади стран, как Россия. Существенные различия природно-климатических условий на различных территориях крупнейшей в мире страны неизбежно требуют планировать отдельные элементы стратегии низкоуглеродного развития с учетом пространственного фактора. Такая работа должна вестись, в том числе, с целью приоритезации расходов в зависимости от поставленных целей и потенциа-

ла конкретных территорий по их достижению (Романовская, 2022).

Между тем, вопросы экономического анализа проблем климатических изменений все еще мало поднимаются в российской литературе. В особенности это замечание касается практически отсутствующего класса работ по моделированию различных аспектов экономики углеродного регулирования, проблемам которой посвящены многие тысячи статей в высокорейтинговых международных изданиях. Возникший разрыв в объеме и качестве исследований по сравнению со многими зарубежными странами не должен служить препятствием для существенно наращивания интенсивности таких работ в нашей стране. Настоящая работа продолжает цикл исследований, направленных на решение задач научного обоснования подходов к достижению национальных целей по достижению существенного сокращения объема выбросов парниковых газов в России.

В исследовании дается количественная оценка факторов, определяющих динамику потерь углерода лесами регионов России. Отличительной особенностью подхода к работе с информационными источниками является использование по-прежнему редко востребованного в России ресурса Global Forest Watch³ — популярного открытого источника агрегированных данных дистанционного зондирования Земли из космоса в качестве источника оценок потерь лесов и возникающих в их результате эмиссий углерода. В качестве факторных переменных рассмотрены переменные, определяющие два важнейших фактора антропогенной динамики лесов (лесозаготовки и пожары), а также блок экономических параметров, включающий различные виды расходов государственного бюджета на различные мероприятия, связанные с организацией лесного хозяйства, лесозащитой и охраной лесов от пожаров. Информация о площадях локализации очагов распространения насекомых-вредителей используется как прокси-переменная для оценки самих потерь лесов в результате воздействия инвазивных видов.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве инструмента оценки потерь углерода лесами используются не данные Национального доклада о кадастре⁴, а информация, опубликованная проектом Global Forest Watch, основанная на

³ Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends. Global Forest Watch. https://www.globalforestwatch.org/map/?modal-Meta=tree_cover_loss (дата обращения 12.11.2022).

⁴ Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1. М., 2022.

² Не выполняют, так согреются // Коммерсантъ. 2022. 1 ноя. <https://www.kommersant.ru/doc/5060885> (дата обращения 05.11.2022).

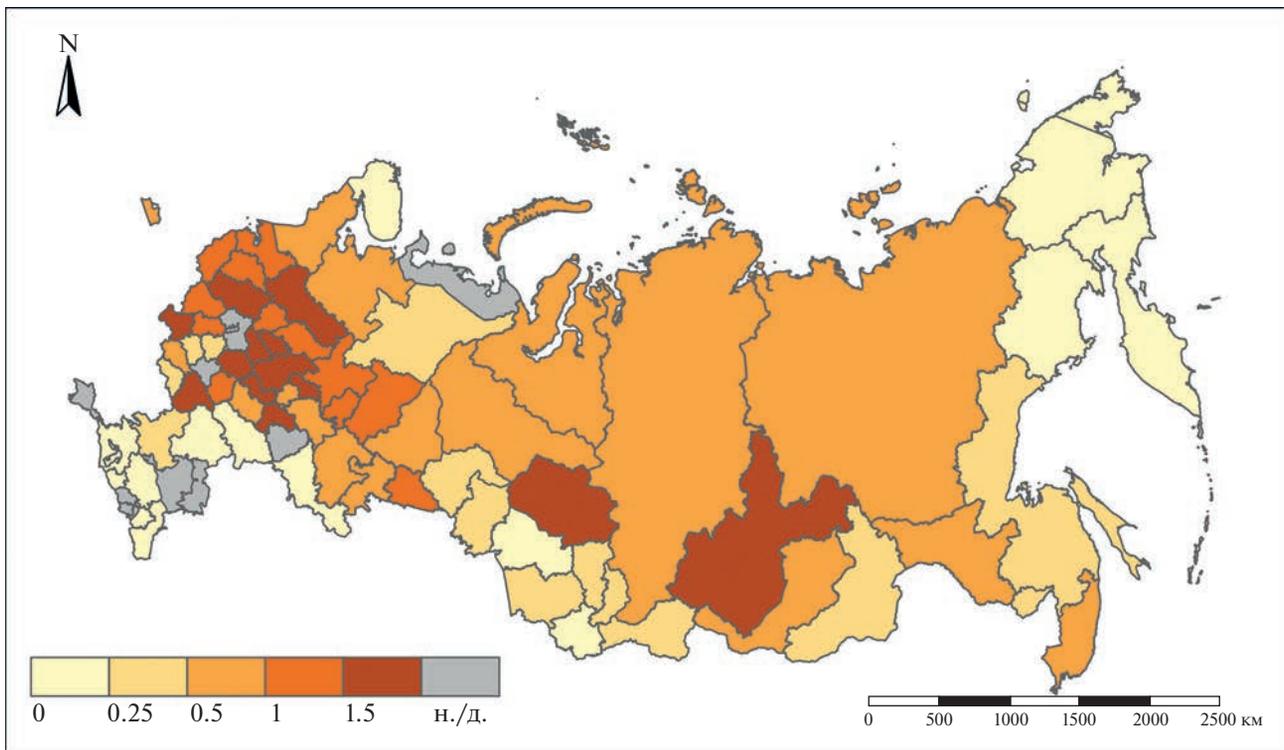


Рис. 1. Распределение средней эмиссии углерода в лесах России в 2009–2021 гг. по отношению к площади лесов субъекта Федерации, т CO₂-экв./га.
 Составлено автором на основе данных Global Forest Watch и слоя административно-территориальных границ Global Administrative Areas Database, ver. 3.6. <http://gadm.org/> (дата обращения 13.11.2022).

исследованиях коллектива Мэрилендского университета (Hansen et al., 2013; Harris et al., 2021), что обосновывается несколькими доводами. Во-первых, спутниковые данные безальтернативны для оперативного мониторинга лесных рубок и пожаров во временном горизонте от дней до нескольких лет. Напротив, регулярные и полноценные наземные измерения, охватывающие большие территории, требуют запретительно высоких расходов, что предопределяет постоянное отставание таких данных от фактической ситуации. Во-вторых, ресурс обеспечивает универсальное агрегирование данных о потерях лесопокрытых площадей и оценок возникающих как их результат эмиссий углерода в разрезе стран и их административно-территориальных единиц вплоть до уровня муниципалитетов за период с 2001 г. В-третьих, эти данные обладают достаточно высокой точностью дешифрирования спутниковых данных, подтвержденной многочисленными исследованиями (Shimizu et al., 2020; Zhang et al., 2020). Полученные данные приводят к следующему пространственному распределению потерь углерода лесами в отношении к их площадям (рис. 1). Очевидна зависимость: наибольшие удельные потери углерода наблюдаются в трех центральных регионах: Рязанской (2.9 т CO₂-экв./га), Влади-

мирской (2.5 т CO₂-экв./га) и Ивановской областях (2.4 т CO₂-экв./га), имеющих примерно одинаковые небольшие площади лесов (от 1.1 до 1.6 млн га), но при этом заготавливающих достаточно большой в сравнении с аналогичными соседями объем древесины (от 1.1 до 1.7 млн м³). При этом лидеры перечня регионов-лесозаготовителей: Иркутская область, Красноярский край и Вологодская область, в этом рейтинге занимают лишь 12, 28 и 6 позиции, поскольку помимо на порядок больших объемов лесопользования характеризуются еще большим разрывом в площади лесов.

Следует подчеркнуть, что представленные данные не должны напрямую сравниваться с оценками Национального доклада о кадастре, поскольку распространяются на всю территорию страны, в то время как Национальный доклад о кадастре учитывает только управляемые лесные земли (Замолодчиков и др., 2017; Романовская и др., 2018; Филипчук и др., 2017; Швиденко, Щепашенко, 2014). Таким образом, оценки, основанные на спутниковых данных, будут всегда существенно выше данных, которые учитываются в целях официальной отчетности в Секретариат Рамочной конвенции по изменению климата ООН (Romanov et al., 2022; Schepaschenko et al., 2021). В то же

время рассмотрение исключительно лесов, располагающихся на управляемых землях, без учета всей территории лесов страны существенно ограничивает аналитические возможности и может влиять на качество принятия государственных решений.

В настоящей работе пространственную неоднородность анализируемых показателей предлагается рассматривать на уровне субъектов Федерации. Такой подход отвечает целям будущей реализации политики управления выбросами и поглощением парниковых газов, поскольку эти механизмы в любом случае должны исходить из сложившейся иерархии государственного управления и максимально эффективно использовать ее ресурсы.

Для анализа влияния факторных переменных сформирован массив данных, охватывающий доступный период наблюдений с 2009 по 2021 г., использующий официальную статистическую информацию Рослесхоза и Росстата, доступную на портале ЕМИСС⁵. Возможности анализа более широкого перечня факторов потерь углерода в лесах существенно ограничены доступностью и качеством исходной статистической информации по лесохозяйственным вопросам (Pyzhev et al., 2021). Первоначально рассматривались все регионы страны, по которым имелся достаточный период наблюдений, однако из окончательной версии были исключены регионы, в которых не доставало большого количества данных (Санкт-Петербург и Москва, Липецкая область, Ненецкий автономный округ) или наблюдались практически нулевые значения потерь углерода лесами (республики Ингушетия, Кабардино-Балкария, Калмыкия, Северная Осетия-Алания, Астраханская и Самарская области). Все экономические показатели для сопоставимости приводились к постоянным ценам 2015 г. с помощью дисконтирования через индекс потребительских цен. В целях формирования сбалансированных панелей данных пропуски наблюдений замещались либо интерполяцией значений по трендам, либо нулями, когда это было обусловлено природой самого показателя (например, в случае расходов на лесозащитные или лесопожарные мероприятия в исходных данных часто встречались пропуски, которые, судя по сопоставлению с другими показателями, фактически означали нулевые значения). Результат привел к базе данных, характеризующейся следующей описательной статистикой (табл. 1).

Моделирование опирается на традиционный для современного анализа экономических проблем инструментарий математической статистики, применяемый для работы с панельными данными, то есть рядами наблюдений над изменени-

ем значений показателей определенного объекта во времени и в пространстве одновременно.

Оценивается следующая регрессионная модель:

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_j \beta_j X_{i,j,t} + \eta_i + v_{i,t},$$

где i является индексом региона ($i = 1, 2, \dots, I$), t – индекс года ($t = 1, 2, \dots, T$), y_{it} – зависимая переменная (оценка эмиссии углерода от потерь лесов), коэффициенты регрессии $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j$ выступают эластичностями влияния константы уравнения и факторных переменных X_1, X_2, \dots, X_j , а через $v_{i,t}$ определяется ошибка модели. В уравнении η_i представляет фиксированный индивидуальный эффект конкретного региона, который учитывает ненаблюдаемую, не зависящую от времени и не контролируемую с помощью факторов уникальную характеристику региона (в том числе, например, географические и климатические особенности, специфические культурные и социально-экономические факторы, которые могут оказывать влияние на сведение лесов). Количественные факторные переменные экономического толка, как правило, распределены экспоненциально, поэтому в модель они включаются под знаком натурального логарифма. Предполагается, что ошибка $v_{i,t}$ и фиксированные эффекты η_i распределены одинаково и независимо с нулевым математическим ожиданием и постоянными дисперсиями. В целях устранения эффектов гетероскедастичности и автокорреляции стандартные ошибки вычисляются с помощью подхода Ареллано–Бонда (Arellano and Bond, 1991).

Поскольку объем использованной выборки достаточно велик, разумно помимо модели для всего набора данных рассмотреть также кластеризованный вариант. С учетом вышеописанного наблюдения о существенности различий выбросов углерода для многолесных регионов севера страны и более южных и меньших по площади краев, областей и республик юга, предлагается выделить отдельные модели для субъектов Федерации, площадь лесов в которых в 2020 г. превышала 10 млн га, и прочих регионов. Данная граница позволяет разделить субъекты в соотношении примерно 1 : 2, при этом собрать в один кластер те субъекты, которые больше всего испытывают влияние потерь лесов, отделив их от регионов, где эта проблема не столь выражена в силу относительно малых запасов данного ресурса.

В целях нивелирования возможного смещения оценок в модель помимо количественных переменных из сформированного набора данных включались бинарные переменные, фиксировавшие отдельные известные события, которые могли существенно влиять на вариацию зависимого при-

⁵ Единая межведомственная информационно-справочная система. <https://www.fedstat.ru> (дата обращения 30.09.2022).

Таблица 1. Описательные статистики для используемого набора переменных

Переменная	Обозначение	Среднее	Ст. откл.	Мин.	25-перц.	75-перц.	Макс.
Потери углерода лесами, тыс. т CO ₂ -экв.	Углерод	11233.2	34131.2	0.3	345.9	7779.8	426278.4
Площадь земель, на которых расположены леса, тыс. га	Площадь	16379.9	37405.6	129.2	930.2	12645.8	256108.7
Объем лесозаготовки, тыс. м ³	Лесозаготовка	2807.3	4864.1	0.5	207.4	3007.2	35668.8
Площадь лесовосстановления, га	Лесовосстановление	12908.8	20962.3	0.000	1249.3	14754.2	157247.4
Протяженность обустроенных минерализованных полос, км	Минполосы	2676.4	3307.4	0.000	522.0	3540.6	25346.4
Протяженность построенных, реконструированных и обслуженных дорог противопожарного назначения, км	Пожарные дороги	849.8	3220.8	0.000	81.0	408.5	37261.7
Площадь локализации очагов вредных организмов авиационным методом, га	Локализация: авиа	1760.8	12609.9	0.000	0.000	0.000	216165.0
Площадь локализации очагов вредных организмов наземным методом, га	Локализация: наземная	1239.9	8184.2	0.000	0.000	40.1	158068.0
ВРП на душу населения, млн руб.	ВРП на душу	447.0	504.3	81.7	241.8	436.0	5017.0
Площадь лесных земель, пройденная пожарами, га	Пожары	55651.2	340954.5	0.000	26.0	4431.0	6724011.0
Расходы на защиту лесов, тыс. руб.	Расходы: лесозащита	8519.9	27276.7	0.000	509.2	6421.8	513185.4
Расходы на лесовосстановление, тыс. руб.	Расходы: лесовосстановление	11488.8	20923.9	0.000	2599.1	15560.4	518179.1
Фонд оплаты труда работников органа исполнительной власти в области лесных отношений, тыс. руб.	Расходы: зарплата	25323.3	22923.3	1011.6	12551.1	28729.6	198336.7
Расходы на осуществление переданных полномочий Российской Федерации в области лесных отношений, тыс. руб.	Расходы: полномочия	342027.1	283976.3	62459.8	163782.3	429013.8	2678332.0
Расходы на охрану лесов от пожаров, тыс. руб.	Расходы: пожары	89455.8	153438.3	0.000	12065.3	105678.7	1828736.0

Составлено автором на основе данных проекта Global Forest Watch, Росстата и Рослесхоза.

знака (например, превышение объема лесозаготовки в регионе пороговой величины в 3 млн м³, годы наиболее высокой лесопожарной активности и пр.).

Все расчеты и визуализации выполнены в среде R с пакетами расширения *plm* (Croissant and Millo, 2008), *svglite* (Wickham et al., 2022)⁶, *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *tmap* (Tennekes, 2018), *stargazer*⁷.

⁶ Wickham H., Henry L., Pedersen T.L., Jake Luciani T., Decorde M., Lise V. *svglite: An “SVG” Graphics Device*. R package version 2.1.0. 2022. <https://CRAN.R-project.org/package=svglite> (дата обращения 30.11.2022).

⁷ Hlavac M. *stargazer: Well-Formatted Regression and Summary Statistics Tables*. R package version 5.2.1. 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=stargazer> (дата обращения 30.11.2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Любопытно сопоставить выбросы углерода от потерь лесов и размеры экономики регионов России с учетом их разделения на малолесные (до 10 млн га лесопокрытой площади) и многолесные (рис. 2). Для наглядности данные представлены в логарифмических шкалах по обоим показателям. Наиболее экономически развитые регионы страны в терминах ВРП на душу населения, как правило, расположены на больших территориях и имеют достаточно обширные запасы лесов. В результате, для таких регионов наблюдается эффект масштаба, отражающийся в высоких в абсолютном выражении потерях углерода. Сама по себе обильность лесных ресурсов в большинстве случаев является предпосылкой для наращивания рубок, а их

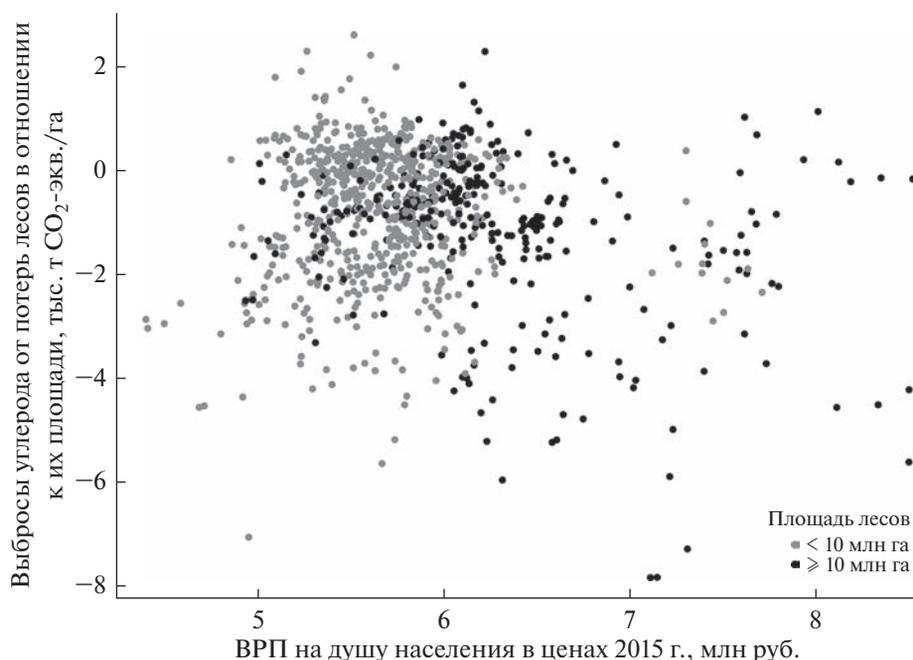


Рис. 2. Соотношение выбросов углерода от потерь лесов на единицу их площади и ВРП на душу населения в постоянных ценах 2015 г. в регионах России в 2009–2021 гг. (логарифмические шкалы). Составлено автором на основе данных Global Forest Watch и данных Росстата.

высокая интенсивность является сопутствующей антропогенной причиной лесных пожаров, которая дополняет эффекты глобального потепления.

Моделирование позволило получить следующие оценки параметров коэффициентов сформулированных регрессионных моделей для используемого набора данных и двух его подвыборок (табл. 2). В целом модели достаточно адекватно оценивают влияние отдельных показателей на зависимый признак. Невысокие значения показателя коэффициента детерминации (от 0.124 до 0.304) свидетельствуют о наличии дополнительных факторов, которые не могли быть учтены в исследовании в силу отсутствия необходимой информации. Также возможным источником смещения является невысокое качество исходных данных, вызванное как манипулятивным характером наблюдения над отдельными статистическими показателями, так и отсутствием фактического контроля за достоверностью публикуемой статистической информации, которое приводит к малообъяснимым артефактам в рядах наблюдений. Кроме того, существенность различий между регионами также далеко не во всех случаях может объясняться даже используемым, достаточно широким набором факторных переменных.

Результаты оценок по моделям демонстрируют устойчивость влияния двух основных факторов потерь лесов: лесозаготовок и лесных пожа-

ров. Оценки для обеих этих переменных имеют ожидаемо положительный знак и объяснимые характеристики значимости. Значимые и высокие эластичности наблюдаются для лесозаготовки: коэффициенты составляют 0.43 и 0.45 для всех регионов и многолесных соответственно, при этом для малолесных регионов коэффициент ощутимо ниже (0.344). Для пожаров результаты также предсказуемы и логичны: коэффициент очень мал для всех регионов (0.034), при этом практически на порядок выше для многолесных регионов (0.267) икратно меньше и статистически незначим — для малолесных (0.007). Этот результат согласуется с известными многочисленными исследованиями по данному вопросу. При этом контрольные переменные для периодов высокой лесопожарной активности проявились только для 2012 г. (эластичность 0.596 для многолесных регионов).

Влияние обустройства минерализованных полос и развития сети противопожарных дорог противоречиво: полученные статистические оценки незначимы как раз для многолесных районов, где проблема низкой плотности транспортной инфраструктуры и больших потерь лесов из-за физической невозможности тушить пожары наземными способами стоит наиболее остро. При этом значимые оценки получились для малолесных регионов и — за счет этого — для совокупности ре-

Таблица 2. Результаты регрессионного моделирования факторов потери углерода лесами регионов России в 2009–2021 гг.

Фактор	Все регионы	Площадь лесов >10 млн га	Площадь лесов ≤10 млн га
Экономические факторы			
Ln (Заготовка)	0.430*** (0.080)	0.450** (0.186)	0.344*** (0.074)
Заготовка >3000	0.297 (0.200)	1.030* (0.559)	0.127 (0.177)
Ln (Минполосы) × (Минполосы >0)	-0.099** (0.045)	-0.042 (0.099)	-0.141*** (0.043)
Ln (Пожарные дороги) × (Пожарные дороги >0)	0.075*** (0.022)	0.079 (0.064)	0.066*** (0.020)
Ln (Расходы: лесозащита)	-0.005 (0.020)	0.084 (0.051)	-0.030* (0.018)
Расходы: лесозащита >0	0.028 (0.426)	-1.985* (1.090)	0.495 (0.389)
Ln (Расходы: лесовосстановление) × × (Расходы: лесовосстановление >0)	-0.014 (0.015)	-0.001 (0.033)	-0.019 (0.015)
Ln (Расходы: зарплата)	0.088 (0.098)	0.369* (0.198)	-0.020 (0.099)
Ln (Расходы: полномочия)	0.474*** (0.140)	0.151 (0.391)	0.184 (0.141)
Ln (Расходы: пожары) × (Расходы: пожары >0)	0.012 (0.036)	0.023 (0.232)	0.007 (0.029)
Природные факторы			
Ln (Пожары)	0.034*** (0.009)	0.267*** (0.040)	0.007 (0.007)
Пожары >0	-0.281** (0.110)	-0.422 (1.015)	-0.132 (0.088)
Ln (Локализация: авиа)	0.106** (0.051)	0.101 (0.121)	0.060 (0.051)
Локализация: авиа >0	-2.274** (1.154)	-2.090 (2.865)	-1.363 (1.114)
Ln (Локализация: наземная) × × (Локализация: наземная >0)	-0.026*** (0.009)	0.003 (0.029)	-0.031*** (0.008)
Год: 2010	-0.007 (0.102)	-0.080 (0.224)	0.022 (0.098)
Год: 2012	0.216** (0.094)	0.596*** (0.210)	0.068 (0.088)
Год: 2018	0.099 (0.097)	0.090 (0.213)	0.018 (0.092)
Контрольные переменные			
Ln (Площадь)	2.617 (1.716)	21.796 (28.500)	2.690 (1.328)
Ln (ВРП на душу)	-0.210 (0.195)	-0.108 (0.395)	-0.624*** (0.200)
Наблюдений	936	299	637
R ²	0.124	0.304	0.146
Скорректированный R ²	0.031	0.193	0.045
F статистика	6.303*** (df = 19; 845)	5.911*** (df = 19; 257)	5.115*** (df = 19; 569)

Примечание. * $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.05$.

Рассчитано автором на основе сформированного набора данных.

гионов в целом. Тем не менее, если знак при переменной для минерализованных полос отрицательный (их обустройство должно снижать риски поражения дополнительных площадей лесов), то для противопожарных дорог наблюдается обратная ситуация, что может объясняться только неочевидными ложными корреляциями данного показателя с ненаблюдаемыми переменными. Описанное выше отсутствие надежной статистической связи между количественными показателями сети минерализованных полос и противопожарных дорог с зависимым признаком в целом объясняется существенным недостатком этой инфраструктуры в стране в целом и особенно в тех регионах, для которых проблема лесных пожаров особенно важна (например, в Красноярском крае, Республике Саха (Якутия) и пр.).

Нет статистически наблюдаемого и надежного показателя поражения лесов насекомыми-вредителями, поэтому для оценки данного явления привлекаются данные по затратам на локализацию очагов вспышек массового размножения авиационным и наземным методом. Учет данных показателей позволил получить несколько значимых оценок для представленных моделей, причем более выраженным ожидаемо оказался эффект от лесозащитных мероприятий, проводимых наземными методами. Тем не менее, поскольку поражение древостоя насекомыми опосредованно влияет на эмиссию углерода в основном через ослабление древостоя и повышение вероятности его гибели от пожаров, результат оценки по данному блоку переменных является куда более слабым, чем для вышеобозначенных факторов.

Более чем красноречивы результаты моделирования по блоку экономических показателей, связанных с государственным расходами на различные лесохозяйственные, лесозащитные и лесопожарные мероприятия. Практически во всех случаях не удалось получить значимые оценки для соответствующих эффектов, что может свидетельствовать об отсутствии прямых причинно-следственных связей между инвестициями в соответствующие лесохозяйственные мероприятия и результатом их реализации. Косвенно это может объясняться тем, что политика расходов на борьбу с пожарами и активностью инвазивных видов насекомых носит не проактивный, а реактивный характер. Дополнительные средства на борьбу с пожарами выделяются сразу после соответствующих пиков лесопожарной активности, приходящихся на весну и лето соответствующего года, при этом средства попадают в бюджетную роспись следующего года, в котором пожаров будет гораздо меньше. В результате, очевидная необходимость в затратах отходит на второй план, уступая место другим приоритетам бюджетных расходов. Затем расходы постепенно сокращаются вплоть до нового пика. Такой цикл является

регулярным и схож с ситуацией в лесозащите, которая также характеризуется контрциклическостью естественной динамики явления и реакции бюджетного планирования.

Единственная выраженная по статистической значимости связь расходов и эмиссии углерода от пожаров получена для расходов на переданные субъектам Федерации полномочия в области лесных отношений (0.474 для всех регионов, но отсутствие значимости для групп малолесных и многолесных регионов). Положительный знак связи указывает скорее на эффект масштаба, чем подтверждает какую бы то ни было причинность, поскольку объем данной субсидии вычисляется нормативно и жестко зависит от площадей эксплуатационных лесов в регионе и иных показателей качества и количества лесных ресурсов, на управление которыми выделяется строго определенный удельный объем финансирования.

Этот результат косвенно может указывать на несовершенство действующего механизма распределения средств на осуществление лесохозяйственных, лесозащитных и лесопожарных мероприятий. Если их истинная цель заключается в сокращении потерь лесов, то представленные выше результаты моделирования свидетельствуют в пользу того, что она не достигается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достижение целей Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов невозможно без существенного наращивания нетто-поглощающей способности лесов. Для этого требуется детальный анализ факторов, которые определяют динамику данного показателя с учетом пространственной неоднородности.

Результаты моделирования показывают, что на эмиссию углерода в лесах регионов России существенное влияние оказывают только объемы лесозаготовки и лесопожарная активность. Вместе с тем расходы на осуществление лесозащитных, лесоохранных и лесохозяйственных мероприятий практически не оказывают влияния на ожидаемое от них сокращение потерь углерода в результате сохранения лесов. Следовательно, развитие государственной лесной политики следует увязывать с необходимостью пересмотра действующего порядка финансирования региональных полномочий в сфере лесных отношений в пользу повышения эффективности выделяемых средств на борьбу с лесными пожарами и лесозащитные мероприятия. Важно отметить, что подобного рода работа будет неэффективной и бессмысленной без перестройки всей институциональной среды лесных отношений в стране. В рамках действующих правил в системе отсутствуют акторы, стиму-

лы которых были бы напрямую увязаны с сохранностью лесов, а не осуществлением бюджетных затрат и составлением по этому поводу соответствующих бюрократических отчетов. Здесь необходимо создание специальных форм конкурентных рынков хозяйствующих субъектов, мотивацией которых является вознаграждение за осуществление государственной задачи по сохранению лесов, причем измерение эффективности такой работы должно проходить не по факту выполненных работ, а именно по ее результату.

Отдельно следует рассмотреть вопрос об оптимизации лесозаготовки в стране, поскольку ее относительно высокие темпы сами по себе являются причиной высоких эмиссий углерода. Это не означает, что лесозаготовку нужно искусственно ограничивать, однако необходимо обсуждать способы повышения ее относительной эффективности с учетом оптимизации выбросов парниковых газов.

В настоящий момент идет активная дискуссия о возможности реализации лесоклиматических инициатив при условии полноценного разворачивания национальной системы углеродного регулирования. В таком случае уже в среднесрочной перспективе может актуализироваться вопрос о том, что выгоднее: рубить древесину или сохранять ее с целью получения углеродных единиц. Однако сама по себе возможность полноценной верификации и организации признанного экономического оборота результатов таких проектов пока ясна не до конца, особенно в свете выявленных в последнее время фактов манипуляций данными об эффективности проектов добровольного углеродного рынка.

Набор статистических моделей, разработанный в рамках настоящего исследования, может быть использован в дальнейшем для прогнозирования оптимальных с точки зрения получения заданной углеродной эффективности объемов лесозаготовки при различных траекториях развития лесопожарной активности. Не исключено, что дальнейшее развитие данного подхода приведет к научно обоснованному ответу на вопрос о возможностях развития лесоклиматического сектора и необходимых для этого экономических условий, и институционального обеспечения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (грант № 19-77-30015). Набор данных, используемый для моделирования, был разработан при поддержке Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Сибирскому федеральному университету (проект № FSRZ-2021-0011). Картографическая визуализация была выполнена при частичном финансировании

Государственного задания Центру экологии и продуктивности леса РАН (проект № АААА-А18-118052400130-7).

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-77-30015). The data set used for modeling was developed with the support of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to Siberian Federal University (project no. FSRZ-2021-0011). Cartographic visualization was carried out with partial funding from the State Assignment to the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (project no. АААА-А18-118052400130-7).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен Д.Г. Замолодчикову и А.А. Романовской за внимание к исследованию и ценные замечания на первом его этапе. Подробные отзывы двух анонимных рецензентов на исходную рукопись помогли существенно улучшить статью. Отличные условия работы были обеспечены Е.А. Вагановым и Е.В. Зандер.

ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful to D.G. Zamolodchikov and A.A. Romanovskaya for their attention to the study and their valuable comments in its first stage. Detailed feedback from two anonymous reviewers on the original manuscript helped to significantly improve the article. Excellent working conditions were provided by E.A. Vaganov and E.V. Zander.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Спутниковая оценка габели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. <https://doi.org/10.31857/S0024114821020029>
- Ваганов Е.А. и др.* Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/EKON.REG.2021-4-4>
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В.* Эко-системные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2021. № 6. С. 581–592.
- Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Семикашев В.В., Колпаков А.Ю.* Экономические риски в контексте разработки политики с низким уровнем эмиссий парниковых газов в России // Энергетическая политика. 2020. № 5 (147). С. 92–103.
- Пыжьев А.И.* Климатическую повестку никто не отменял: почему это важно для российской экономики // ЭКО. 2022. № 7 (577). С. 31–50. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-7-31-50>

- Романовская А.А., Трунов А.А., Коротков В.Н., Карabanь Р.Т. Проблема учета поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. 2018. № 5. С. 323–334.
- Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н., Малышева Н.В. Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте Парижского соглашения об изменении климата // Лесохозяйственная информация. 2017. № 1. С. 88–98.
- Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития и роль лесов в ее реализации // Науч. труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. С. 399–426.
- Швиденко А., Щепаченко Д. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Arellano M., Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations // Review of Economic Studies. 1991. Vol. 58. № 2. 277 p. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Croissant Y., Millo G. Panel Data Econometrics in R: The plm Package // J. of Statistical Software. 2008. Vol. 27. № 2.
- Filipchuk A. et al. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. Vol. 26. P. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.002>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. № 6160. P. 850–853.
- Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // Nature Climate Change. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests // Science. 2011. Vol. 333. № 6045. P. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Vaganov E.A. Reliability and Integrity of Forest Sector Statistics – A Major Constraint to Effective Forest Policy in Russia // Sustainability. 2021. Vol. 1. № 13. 86 p. <https://doi.org/10.3390/su13010086>
- Rogelj J., Geden O., Cowie A., Reisinger A. Net-Zero Emissions Targets Are Vague: Three Ways to Fix // Nature. 2021. Vol. 591. № 7850. P. 365–68. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>
- Romanov A.A. et al. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021 // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 846. № 157322.
- Schepaschenko D. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 1. P. 12825.
- Shimizu K., Ota T., Mizoue N. Accuracy Assessments of Local and Global Forest Change Data to Estimate Annual Disturbances in Temperate Forests // Remote Sensing. 2020. Vol. 15. № 12. P. 2438. <https://doi.org/10.3390/rs12152438>
- Tennekes M. tmap: Thematic Maps in R // J. of Statistical Software. 2018. Vol. 84. № 6.
- Wickham H. et al. Welcome to the Tidyverse // J. of Statistical Software. 2019. Vol. 4. № 43. P. 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Zhang D., Wang H., Wang X., Lü Z. Accuracy Assessment of the Global Forest Watch Tree Cover 2000 in China // Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. № 87. P. 102033. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102033>

Economic and Natural Factors of Spatial Heterogeneity of Forest Carbon Emissions in Russia in the 2010s

A. I. Pyzhev^{1, 2, 3, *}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS, Novosibirsk, Russia

*e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru

Increasing the net carbon sequestration of forests is the only way for Russia to achieve carbon neutrality by 2060. In this context, along with measures to increase the area and quality of stands, ways to reduce carbon emissions due to human activities and natural disturbances are important. The article uses regression models of panel data to analyze the spatial heterogeneity of carbon emissions in the Russian forests in 2009–2021 as measured by Global Forest Watch project tools, depending on economic (volume of logging, government spending on forest management, forest protection and forest fire measures) and natural (scale of forest fires and outbreaks of mass reproduction of insect pests) factors. Logging and forest fires are expected to have the greatest impact on forest carbon losses, while spending on the performance of state functions in the sphere of forest relations has almost no response in the reduction of carbon emissions. Thus, in fact, the goal of preserving forests through public investment in appropriate measures has not yet been achieved. The resulting

set of regression models can be used to predict the dynamics of the regional effects of forest carbon losses under changes in logging volumes and various trajectories of the dynamics of forest fire activity. Such analysis will be critically necessary for the formation of regional plans for greenhouse gas emission reduction, taking into account the maximum use of the potential of forests' net carbon sequestration build-up.

Keywords: economics of climate change, economics of carbon regulation, forest carbon budget, carbon emissions, statistical modeling, regression analysis of panel data, Global Forest Watch

REFERENCES

- Arellano M., Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Rev. Econ. Stud.*, 1991, vol. 58, no. 2, pp. 277–297. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V. An assessment of the forest stands destruction by fires based on the remote sensing data on a seasonal distribution of burnt areas. *Lesoved.*, 2021, no. 2, pp. 115–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020029>
- Croissant Y., Millo G. Panel Data Econometrics in R: The plm Package. *J. Stat. Softw.*, 2008, vol. 27, no. 2.
- Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity. *Environ. Dev.*, 2018, vol. 26, pp. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.002>
- Filipchuk A.N., Moiseev B.N., Malysheva N.V. New aspects of assessment of greenhouse gases sequestration by Russian forests in context of Paris Agreement on Climate Change. *Lesokhoz. Inform.*, 2017, no. 1, pp. 88–98. (In Russ.).
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., 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, no. 6160, pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., de Bruin S., Farina M., Fatoyinbo L., Hansen M.C., Herold M., Houghton R.A., Potapov P.V., Suarez D.R., Roman-Cuesta R.M., Saatchi S.S., Slay C.M., Turubanova S.A., Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change*, 2021, vol. 11, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021, vol. 50, pp. 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 2011, vol. 333, iss. 6045, pp. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Porfiriev B.N., Shirov A.A., Semikashev V.V., Kolpakov A.Yu. Economic risks in the context of policy development with low greenhouse gas emissions in Russia. *Energet. Politika*, 2020, no. 5 (147), pp. 92–103. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_5147_92
- Pyzhev A.I. Nobody cancelled the climate agenda: why it's important for Russian economy. *ECO*, 2022, no. 7 (577), pp. 31–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-7-31-50>
- Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Vaganov E.A. Reliability and Integrity of Forest Sector Statistics – A Major Constraint to Effective Forest Policy in Russia. *Sustain.*, 2021, vol. 1, no. 13, 86 p. <https://doi.org/10.3390/su13010086>
- Rogelj J., Geden O., Cowie A., Reisinger A. Net-Zero Emissions Targets Are Vague: Three Ways to Fix. *Nature*, 2021, vol. 591, no. 7850, pp. 365–368. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>
- Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gloor E., Brienen R., Gusev B.A., Leonenko E.V., Vasiliev A.S., Krikunov E.E. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021. *Sci. Total Environ.*, 2022, vol. 846, no. 157322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157322>
- Romanovskaya A.A., Trunov A.A., Korotkov V.N., Karaban R.T. The problem of accounting for the absorptive capacity of Russian forests in the Paris Agreement. *Lesoved.*, 2018, no. 5, pp. 323–334. (In Russ.).
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Onitkov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepaschenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 12825. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Shwarts E.A., Ptichnikov A.V. Low-carbon development strategy and the role of forests in its implementation. *Nauch. Tr. Vol'n.Ekonom. Obshch.*, 2022, no. 236, pp. 399–426. (In Russ.).
- Shimizu K., Ota T., Mizoue N. Accuracy Assessments of Local and Global Forest Change Data to Estimate Annual Disturbances in Temperate Forests. *Remote Sens.*, 2020, vol. 15, no. 12, p. 2438. <https://doi.org/10.3390/rs12152438>
- Shvidenko A., Schepaschenko D. The carbon budget of Russia's forests. *Sibir. Lesnoi Zh.*, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).
- Tennekes M. tmap: Thematic Maps in R. *J. Stat. Softw.*, 2018, vol. 84, no. 6.
- Vaganov E.A., Porfiriev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Pyzhev A.I. Estimation of the contribution of Russian forests to the reduction of climate change risks. *Reg. Econ.*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 1096–1109. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/EKON.REG.2021-4-4>

- Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L.D'A., François R., Golemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H. Welcome to the Tidyverse. *J. Stat. Softw.*, 2019, vol. 4, no. 43. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kaganov V.V. Ecosystem services and spatial distribution of protective forests of the Russian Federation. *Lesoved.*, 2021, no. 6, pp. 581–592. (In Russ.).
- Zhang D., Wang H., Wang X., Lü Z. Accuracy Assessment of the Global Forest Watch Tree Cover 2000 in China. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2020, no. 87, p. 102033. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102033>