

DOI 10.31509/2658-607x-202372-147
УДК 502.52:574.4:63

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ БАЛАНСА УГЛЕРОДА ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2024 А. И. Банчева*, Н. Н. Алексеева, Д. А. Третьяченко, Ю. С. Гринфельдт

МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

*E-mail: ban-sai@mail.ru

Поступила в редакцию: 07.02.2024 г.

После рецензирования: 28.04.2024

Принята к печати: 03.05.2024

Трансформация форм землепользования – важный фактор, который необходимо учитывать в оценках выбросов углекислого газа, при этом количественные оценки изменений потоков и запасов углерода в секторе «Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство» в значительной степени менее достоверны, чем оценки выбросов от стационарных источников и транспорта. Цель работы – апробация методики региональной оценки запасов углерода экосистем и их изменений в связи с трансформацией землепользования/наземного покрова (на примере Ярославской области). Использовались общедоступные пространственные данные о наземном покрове Европейского космического агентства и литературные данные по плотности углерода в основных резервуарах наземных экосистем. Расчеты проводились в программах InVEST, ArcGIS, MS Excel. Установлено, что в 2019 г. общие запасы углерода в экосистемах Ярославской области составили около 337.4 млн тонн. Около 73% общих запасов углерода аккумулировано в лесных экосистемах, в пашнях, пастбищах и лугах – около 20%, в болотах – 5%. Динамика запасов за период 1992-2019 гг. положительная, что объясняется увеличением площадей залесенных и заболоченных территорий. В целом, за 1992–2019 гг. изменения в наземном покрове затронули 6.8% территории области, что привело к росту запасов углерода в наземных экосистемах на 5.66 млн тонн. Тенденции изменения землепользования и динамики запасов углерода в разных классах наземного покрова/типах экосистем могут учитываться при разработке рекомендаций на уровне регионов по управлению экосистемами для сокращения выбросов и увеличения поглощения углекислого газа.

Ключевые слова: бюджет углерода, парниковые газы, изменение климата, InVEST, наземный покров, депонирование углерода, европейская территория России, углекислый газ, климатическая политика, низкоуглеродное развитие

Выбросы углерода в результате землепользования – второй после сжигания горючего топлива источник поступления углекислого газа в атмосферу. С доиндустриального периода прямые эмиссии углерода от изменения использования земель составили около трети всех антропогенных выбросов (Han et al., 2016). Трансформация форм землепользования (например, перевод сельскохозяйственных или лесных земель в др. категории), интенсификация или снижение антропогенных нагрузок, изменение режимов хозяйственного функционирования земель – важные факторы, которые необходимо учитывать в оценках выбросов парниковых газов, особенно углекислого газа, метана и оксида азота. Изучение структуры и динамики изменений выбросов от землепользования важно для понимания углеродного цикла и разработки механизмов углеродной нейтральности, которая является целью многих стран в соответствии с Парижским соглашением в рамках Рамочной конвенции ООН по изменению климата (2015).

В Российской Федерации значимый вклад в выбросы диоксида углерода от землепользования вносят в основном пахотные земли, лесозаготовки и лесные пожары, относительно меньший – постоянные сенокосы и пастбища, перевод па-

хотных земель в поселения и прочие земли, осушение органических почв и торфоразработки. По данным (Национальный доклад..., 2023) в 2021 г. в секторе «Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство» происходило нетто-поглощение парниковых газов (-484.8 млн т CO₂-экв.), обусловленное в целом большим объемом поглощения лесами. Количественные оценки изменений потоков и запасов углерода в этом секторе в значительной степени менее достоверны, чем оценки выбросов от стационарных источников углекислого газа (энергетика, промышленные процессы и использование продукции, отходы) и транспорта (Fryer, Williams, 2021).

Региональные оценки баланса углерода приобретают особую актуальность в связи с реализацией «Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» (принята 29 октября 2021 г. № 3052-р), а также в рамках отчетности по определяемым на национальном уровне вкладам по Парижскому соглашению. Исследованиями баланса углерода суши занимаются научные группы ряда институтов и университетов, накопившие существенный опыт и задел, в т.ч. по оценкам запасов и потоков углерода в почвах и фитомассе

разных природных зон и типов экосистем (в т.ч. хвойных, смешанных и широколиственных лесов, степей, болот).

В региональных масштабах все оценки выбросов и поглощения углерода выполняются расчетным путем (Малышева и др., 2017). В соответствии с методологией МГЭИК расчеты и моделирование потоков углерода проводят на основе двух подходов – расчета баланса потоков углерода (разница между поглощением при увеличении углеродных пулов и потерями в результате природных процессов и хозяйственных нагрузок, пожаров, межгодовой изменчивости и проч.) и по разности запасов (между оценками запасов углерода для двух моментов времени) (Руководящие принципы..., 2016). Для этого используются разнообразные информационные источники: данные дистанционного зондирования, геопространственные данные по наземному покрову, географические базы данных (например, Информационная система «Почвенно-географическая база данных» (Информационная..., 2023)), сведения Государственного лесного реестра, почвенные карты, официальные статистические данные и др. Оценки баланса углерода в основном проводятся с использованием нескольких подходов: количественной оценки потоков с использова-

нием математических моделей (например, Century, CO2Fix, CEVSA-ES, LPJ-GUESS, РОБУЛ и др.) и расчетов изменения запасов по разности запасов на основе геопространственных данных.

В нашей стране выполнен большой объем исследований по оценке углеродного баланса лесов на основе экспериментально-полевых, информационно-аналитических, геоинформационных, дистанционных и модельных работ (например, Швиденко, Щепаченко, 2014; Малышева и др., 2017; Замолодчиков и др., 2018; Коломыц, 2020). Методика региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ) разработана в ЦЭПЛ РАН (Замолодчиков и др., 2011). Сравнение различных систем оценки углеродного баланса лесными экосистемами России рассмотрены в работе (Сорокина и др., 2023). Значительное число исследований имеется по расчетам запасов и динамики органического углерода в почвах в природных экосистемах и под влиянием хозяйственной деятельности (например, Щепаченко и др., 2013; Чернова и др., 2020; Иванов и др., 2021).

Однако работ по комплексному исследованию динамики баланса углерода в связи с трансформацией систем землепользования и наземного покрова, выполненных в региональном масштабе

для российских территорий, не так много. Так, в исследовании (Чернова и др., 2018) проводится оценка запасов углерода в исторической перспективе для южной тайги и лесостепи Европейской России, сравниваются потенциальные запасы в зональных (восстановленных) и в современных экосистемах. О влиянии изменений землепользования в Чеченской республике на динамику углерода сообщают А. Н. Гуня и соавторы (Гуня и др., 2021), обращая внимание на важность ландшафтного подхода. Вклад землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России за период 2000–2011 гг. охарактеризован в работе А. А. Романовской с соавторами (Романовская и др., 2014). Частично российские территории рассматриваются и в работе (Winkler et al., 2023), где авторы делают вывод о снижении запасов углерода в Восточной Европе на 52% из-за изменений в землепользовании в период 2010–2019 гг. (оценивается только пул наземной фитомассы).

Для количественных оценок экосистемных услуг регионов, в том числе поглощения углерода в результате изменений землепользования, используются разнообразные инструменты и модели. Это инструмент InVEST®, основанный на пространственно определенных данных,

ARIES – на статистических данных, процессная модель CEVSA-ES, использующая индексы листовой поверхности на основе ДДЗ (Niu et al., 2021), модель BLUE (Winkler et al., 2023) и др. Так, модель InVEST была применена (в разных масштабах) во множестве исследований по оценке баланса углерода под влиянием землепользования: для регионов Китая (Zhang et al., 2020), Индии (Ghosh et al., 2022), Ирана (Lahiji et al., 2020), Бразилии (Fernandes et al., 2021), Гамбии (Dampah, 2021) и др. Однако работ по России, использующих для таких целей данный инструментарий, практически нет. Несколько работ опубликовано китайскими учеными, в которых представлены результаты по балансу углерода для трансграничных районов – бассейна реки Туманная (Xiang et al., 2018) и для экономического коридора Китай-Монголия-Россия (Li et al., 2022), а также работа коллектива авторов для территории Китая и России (г. Йошкар-Ола) (Lai et al., 2022).

Как правило, такие исследования проводятся либо на основе дешифрирования космических снимков для оценки динамики наземного покрова, либо с использованием готовых баз геопрограммированных данных по изменению землепользования, имеющих свои преимущества и недостатки. Возможности их ис-

пользования для геоэкологических исследований рассмотрены в статье Алексеевой с соавторами (Алексеева и др., 2017). Число таких баз данных постоянно увеличивается, в настоящее время в открытом доступе представлено около 60 глобальных и региональных баз по землепользованию и наземному покрову и около 50 тематических продуктов (Wang et al., 2023). Поскольку в оценках баланса углерода каждому классу земельного покрова присваивается собственное (уникальное) значение плотности углерода, особенно важны точность классификации землепользования, разрешение используемых геопространственных данных, а также учет развития природно-хозяйственных систем во времени (Zeng et al., 2022).

Цель работы заключается в апробации методики региональной оценки поглощения и выбросов углерода на основе открытых геопространственных данных по динамике наземного покрова и данных по удельному содержанию (плотности) углерода для разных категорий земель. Работа выполнена в программе InVEST на примере одного из субъектов Российской Федерации – Ярославской области. В задачи входила отработка алгоритма исследования, включая выбор оптимальной базы геопространственных

данных по наземному покрову, выявление изменений, произошедших в землепользовании за период исследования, поиск данных по плотности углерода по классам наземного покрова/экосистем, расчеты в модели InVEST запасов углерода по пулам по классам наземного покрова, а также определение причинно-следственных связей выявленных изменений с привлечением статистических данных, официальных материалов, научных публикаций.

Основные зональные типы ландшафтов Ярославской области – южнотаежные и подтаежные леса, представленные хвойными (ель, сосна), мелколиственными (береза, осина) и смешанными лесами. Практически все леса производные и представляют собой массивы с преобладанием березы, осины, серой ольхи, с примесью хвойных деревьев (ель, сосна) или отдельными участками хвойных лесов (Леса высокой..., 2023).

Земельные ресурсы Ярославской области представлены преимущественно землями лесного фонда, занимающими около 1.68 млн га, или 46.4% территории. Общая площадь земель сельскохозяйственного назначения в 2019 г. составила 1.21 млн га., или 33.5% территории области. Сельскохозяйственные угодья представлены в основном пашнями (722.1

тыс. га). Под земли населенных пунктов отведено 203.1 тыс. га (5.6%) (Государственный доклад..., 2019; Доклад..., 2020).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты общих запасов углерода проводились в программе InVEST, разработанной в Стэнфордском университете (Natural Capital Project, 2024) для моделирования пространственно-временных изменений объемов (потоков) и стоимости экосистемных услуг при различных траекториях землепользования. Наряду с возможностью оценок прочих экосистемных услуг, заложенной в данной программе, для оценки услуги по поддержанию глобального цикла углерода разработан углеродный модуль, который позволяет провести оценку баланса углерода по методу разности запасов в соответствии с методологией (Руководящие принципы..., 2016). Для расчетов необходимы пространственные данные о наземном покрове изучаемой территории и данные об удельных запасах углерода (содержание на единицу площади) по четырем пулам (резервуарам) для каждого класса земельного покрова. Углеродный модуль модели InVEST оценивает в каждой ячейке сетки суммарные запасы углерода в четырех пулах за определенный год.

Оценка динамики землепользования осуществлялась в программе ArcGIS. Также ArcGIS и MS Excel были использованы для углубленных и более детальных расчетов запасов углерода (по классам наземного покрова и по каждому из выявленных переходов классов наземного покрова, отражающих его динамику) и для анализа связи трансформации землепользования и запасов углерода.

Для выбора баз геопрограммных данных по наземному покрову были проанализированы несколько источников. Условием отбора было соответствие следующим критериям – длинный гармонизированный ряд данных (с начала 1990-х гг.), наличие в открытом доступе, проведенная валидация, развернутая легенда. Кроме того, авторы посчитали целесообразным использовать среднее разрешение (100–500 м) геопрограммных данных по наземному покрову, которые легче соотнести с фрагментарными данными по плотности углерода, чем данные высокого разрешения (10 м, 30 м). Среднее пространственное разрешение (230 м) также используется для картографирования типов экосистем/растительности России ИКИ РАН за 2000–2018 гг. (легенда близка к категориям наземного покрова) (Барталев и др., 2011). Зна-

чительная часть ранних баз данных (например, UMD Land Cover Classification, полученных в результате обработки данных AVHRR за 1981–1994 гг. (разрешение 1100 м) и DISCover land cover (AVHRR) за 1992–1993 гг. (1000 м)) не обновляется. Наиболее детальные классификации Global Landcover 2000 (SPOT4 Vegetation) и GlobCover 2009 (ENVISAT MERIS) (300 м), MODIS Land Cover, 2001–2012 (MODIS Terra/Aqua) (500 м) включали 21, 18 и 16 классов соответственно. Они также охватывают ограниченный временной интервал. Более поздний продукт Land Cover Type (MCD12Q1) Ver. 6 (500 м) предоставляет типы земного покрова с ежегодными интервалами за 2001–2020 гг.

Задаче выделения ареалов однотипных изменений землепользования за 30-летний период наиболее соответствовали данные по наземному покрову Европейского космического агентства (ESA) (The European Space., 2023), предоставляющего согласованные карты, начиная с 1992 г. в системе классификации наземного покрова (LCCS, Land Cover Classification System), принятой ФАО ООН. Классификация земельного покрова ФАО обеспечивает единообразную основу для картирования наземного покрова суши, позволяющую отнести каждый пиксел к одному из заранее определенных классов.

Преимуществом этих данных является достаточно дробный уровень дифференциации наземного покрова (21 категория), в то время как другие базы данных, даже с большим пространственным разрешением, имеют вдвое меньшее число генерализованных категорий (Wang et al., 2023). Геопространственные данные ESA включают такие классы наземного покрова как хвойные и широколиственные леса, а также водно-болотные угодья, что принципиально важно для оценки запасов углерода. Разрешение пиксела в исходных растрах составляет 300 м. Благодаря наличию длинного временного ряда данных, для анализа динамики земельного покрова Ярославской области выбраны данные 1992 и 2019 гг.

В начале исследования была проведена первичная обработка исходных данных: из мирового растра вырезана Ярославская область, выполнено перепроецирование растра в проекцию WGS 1984 UTM Zone 37N с разрешением 100×100 м (для удобства дальнейших расчетов и анализа результатов в единицах измерения «гектар»).

Для уточнения сущности классов (определение преобладающих групп древесных пород, характера заболоченных территорий), там где это было возможно, использовались данные портала лесов

высокой природоохранной ценности (Леса высокой., 2023) и сайта «Космическая обсерватория: Леса России из космоса» (Космическая обсерватория..., 2024), Open Street Map, атлас Ярославской области (Атлас Ярославской области, 1999) и космические снимки открытого доступа Google Earth для проведения визуального дешифрирования. На основании схожести географических и биологических (продукционных) характеристик некоторых классов и ввиду ограниченности данных о плотности углерода в научных публикациях (см. ниже), исходные 21 категория были сгруппированы в 12 обобщенных классов (табл. 1).

Так, в один класс наземного покрова были объединены все виды *пахотных земель*: неорошаемые пашни, мозаики пахотных земель с природной растительностью (с долей пашни более 50%) и сеяные луга. В класс *лугов* включены собственно травяной покров, который занимает наибольшие площади в данном классе, а также мозаики травяного и древесно-кустарникового покрова и закустаренные земли (возможно, залежи), занимающие крайне небольшую площадь. Объединены в один класс территории с *разреженной растительностью* и *лишенные*

растительности. Переувлажненные земли (т.н. «затапливаемые» в оригинале легенды) с древесной и луговой растительностью объединены в один класс ввиду отсутствия детальных данных по углероду и названы «*Водно-болотные угодья*». Разделение *мелколиственных лесов* на сомкнутые (как правило, это полновозрастные леса) и разреженные оставлено для возможности максимально дифференцировать типы лесных экосистем по запасам углерода (по легенде ФАО сомкнутость полога деревьев в разреженных лесах составляет 15–40%, в сомкнутых – более 40%). *Селитебные зоны* и *водные объекты* исключены из расчетов из-за недостатка данных по запасам углерода.

Необходимые данные по запасам углерода в различных классах земельного покрова по четырем пулам (резервуарам): надземная фитомасса (Cabove), подземная фитомасса (Cbelow), почва (Csoil, 0-100см) и мертвое органическое вещество (Cdead) – были получены из литературных источников (табл. 1). Пул лесной подстилки как отдельный резервуар в расчеты не включался ввиду ограничений программы InVEST, однако в ряде случаев был включен в другие пулы.

Таблица 1. Классы земельного покрова и литературные данные плотности углерода по пулам, т/га

	Исходные классы наземного покрова (ESA)	Обобщенные классы наземного покрова	Cabove			Csoil			Cdead	Ctotal	Источник
1	Неорошаемые пашни	Пашни	5	64	0	69	Чернова и др., 2018				
	Сеяные луга										
2	Мозаики пашен (>50%) и природной раст-ти	Мозаика (молодой древо-стой, луга и пашни)	37.6	15.1	нд	58.7	Рыжова и др., 2014				
	Мозаики природной раст-ти (>50%) и пашен										
3	Лиственные леса, включая разреженные	Разреженные мелко-лиственные леса	42.5	12.5	3.7	89.5	коэф.0,5 к п.4				
	Мозаики древесно-кустарниковой раст-ти (>50%) и травяного покрова										
4	Сомкнутые лиственные леса	Сомкнутые мелколиственные леса	85	25	7.3	178.8	Рыжова и др., 2014; Замолодчиков и др., 2013				
5	Хвойные леса, включая разреженные	Хвойные леса	118	46.5	6.9	171.4	Чернова и др., 2018; Замолодчиков и др., 2013				
	Сомкнутые хвойные леса										
6	Смешанные леса	Смешанные леса	114	64	7	185	Чернова и др., 2018; Рыжова и др., 2014; Честных и др., 2022				
7	Мозаики травяного (>50%) и древесно-кустарникового покрова	Луга (естественные пастбища, залежи)	5	64	1	70	Чернова и др., 2018; Карелин и др., 2017				
	Травяной покров										
	Закустаренные территории										
	Лиственные кустарники										
8	Разреженная растительность	Без растительности или с разреженной растительностью	0.3	0.5	нд	0.8	Чернова и др., 2018				
	Разреженные кустарники										
	Территории, лишенные растительности										
9	Древесный покров, затопляемый	Водно-болотные угодья	33	425	нд	478*	Чернова и др., 2018				
10	Кустарниковый или травяной покров, затопляемый	Селитебные зоны	-	-	-	-	-				
	Городские территории										
11	Водные объекты	Водные объекты	-	-	-	-	-				

Примечание: «нд» – нет данных, в расчетах заменено на «0»; «<» – исключены из расчетов; для водно-болотных угодий, перешедших в данный класс за период 1992-2019 гг., принято значение 265 т/га в Cabove, 191 т/га в Csoil (Чернова и др., 2018)).

Поскольку систематизированных данных по средним удельным запасам углерода по типам ландшафтов и/или категориям землепользования для Европейской территории России нет, мы использовали сведения из научной литературы и методических разработок. Основными источниками данных по плотности углерода послужили статьи О. В. Черновой с соавторами, посвященные исследованиям в Костромской области (Чернова и др., 2018, 2020). Ввиду отсутствия подобных исследований по Ярославской области и с учетом схожести природно-зональных условий Костромской и Ярославской областей, было принято допущение о возможности использования для нашего исследования данных по Костромской области. Некоторые исследования (Уфимцев и др., 2022; Карелин и др., 2017) выполнены для отличных от южнотаежной природных зон, однако их результаты были все же использованы нами в качестве ориентировочных значений ввиду отсутствия более точных данных.

Для основных типов экосистем использованы следующие данные. Для *хвойных лесов* данные по пулам фитомассы и почв заимствованы из результатов исследования О. В. Черновой с соавторами, проведенных в сосново-еловом лесу Костромской области (Чернова и др.,

2018). Данные по пулу мертвого органического вещества – из результатов работы Д. Г. Замолодчикова с соавторами, полученным для хвойных лесов Костромской области (усредненные данные по участкам с еловыми и сосновыми древостоями) (Замолодчиков и др., 2013).

Для *мелколиственных лесов* взяты значения, полученные для 50-летнего березово-елового леса Костромской области (пулы наземной и подземной фитомассы и почвы) (Рыжова и др., 2014). Данные по пулу мертвого органического вещества – также из результатов работы, полученным для участков осиново-березового леса (Замолодчиков и др., 2013). Дифференциация лесов по сомкнутости полога древостоя в используемом растре наземного покрова ESA позволила использовать в расчетах более точные результаты и по запасам углерода. На основании выводов в работе Уфимцева В. И. и Андроханова В. А. для разреженных лесов к значениям по сомкнутому лесам был принят коэффициент 0.5 (Уфимцев и др., 2022).

В *смешанных лесах* запасы углерода в фитомассе посчитаны как средние значения запасов в хвойных и мелколиственных лесах, а запасы углерода в почвах взяты из работы О. В. Честных с соавторами, проведенной в хвойно-широколиственных лесах (Честных, 2022).

Данные по *пашням и лугам* заимствованы из работ И. М. Рыжовой (пулы фитомассы и почвы) (Рыжова и др., 2014) и Д. В. Карелина (пул мертвого органического вещества) (Карелин и др., 2017).

Ячейкам класса «Водно-болотные угодья» присвоены значения запасов углерода, полученных О. В. Черновой с соавторами, (2018) для верховых, переходных и низинных болот – 478 т/га. При последующих расчетах, обработке и анализе результатов в MS Excel для уточнения выводов ячейкам класса «Водно-болотные угодья» в растре 2019 г. были присвоены дифференцированные значения запасов углерода: землям, не поменявшим свой класс с 1992 г., присвоено то же значение, что и в 1992 г. (478 т/га), а землям, которые перешли в данный класс за последние 27 лет (т.е. поменявшим свой класс с любого другого на «Водно-болотные угодья») – более низкое значение (265 т/га), с целью избежать завышенных значений для молодых водно-болотных угодий. Анализ вклада различных классов наземного покрова в баланс углерода области выполнен на основе именно уточненных результатов.

Наиболее сложной для интерпретации природных характеристик и запасов углерода оказалась категория земель-

ного покрова «Мозаики природной растительности (доля >50 %) и пашни». В итоге для нее было рассчитано среднее арифметическое между запасами углерода на пахотных землях, в лугах и в залежи с 25-летним лесом (по данным (Рыжова и др., 2014)).

Данные по Ярославской области частично были проверены по таблице «Средние величины запасов углерода в различных пулах, используемые в расчетах потерь при обезлесении по субъектам в Российской Федерации» (Методические указания..., 2017). На покрытых лесом землях начальные запасы углерода (т/га) составляли в пуле наземной фитомассы 52.53, подземной фитомассы – 13.55, мертвого органического вещества – 14.41, органического углерода почвы – 76.65. Данные по Костромской области по всем пулам, кроме почвенного углерода немного ниже, но в целом очень близки: 48.89, 12.7, 13.9 и 77.01 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным ESA для Ярославской области характерна следующая структура наземного покрова (2019 г.): 60% территории занято лесами (где абсолютно преобладают разреженные мелколиственные леса) и 22% – пашнями. Остальные классы занимают существенно

меньшую площадь (хвойные леса – 7%, водно-болотные угодья – 6% и др.).

Анализ данных в ГИС показал, что за период 1992-2019 гг. изменения наземного покрова произошли на площади 2.4 тыс. км², или 6.8% территории области. Это преимущественно процессы зарастания древесной растительностью (т.е. в широком смысле, залесения) и наоборот – ее сокращения (обезлесения), расширения и уменьшение площадей заболоченных территорий.

Каждый процесс отражает несколько типов переходов одного класса наземного покрова в другой, причины которых могут быть различны. Например, залесение включает в себя 16 типов переходов, из которых преобладают по площади те, что связаны с зарастанием разреженными мелколиственными лесами участков с мозаичной структурой наземного покрова – такие изменения произошли за исследуемый период на площади 773 км². Другие переходы – это зарастание мелколиственными лесами пашен и лугов, увеличение сомкнутости леса (смена разреженных лесов на сомкнутые), зарастание лесом территории, лишенной растительности в прошлом и др. Всего процессы залесения (сумма всех 16 типов переходов) отмечены на площади 1.5 тыс. км².

Сокращение древесного покрова наблюдалось на втрое меньшей территории (537 км²). В результате этого к 2019 г. залесенная площадь в Ярославской обла-

сти (точнее, площадь территории с древостоем) увеличилась примерно на 960 км² по сравнению с 1992 г.

Расширение и сокращение водно-болотных угодий отмечено в гораздо меньших масштабах (98 км² и 12 км² соответственно), однако эти процессы существенны с точки зрения изменения баланса углерода, поэтому ниже они будут рассмотрены подробнее.

В результате расчетов, проведенных в InVEST, получено, что в 1992 г. общие запасы углерода в наземных экосистемах Ярославской области составляли около 331.72 млн т. В результате трансформации наземного покрова за 27 лет запасы углерода выросли на 5.66 млн тонн и составили в 2019 г. 337.39 млн тонн (рис. 1 и 2).

В целом, пространственная характеристика запасов углерода повторяет рисунок природно-ландшафтных зон: наибольшие удельные запасы углерода (тонн в пикселе) приурочены к заболоченным территориям в Некоузском, Мышкинском и Первомайском районах и смешанным лесам Пошехонского, Первоймайского, Рыбинского, Угличского и Переславль-Залесского районов (рис. 1). Большими удельными запасами выделяется также Дарвинский природный заповедник в подзоне южнотаежных лесов (Брейтовский район). Меньшие запасы характерны для лугов и пашен, расположенных преимущественно в Ярославском, Тутаевском, Даниловском и Ростовском районах.

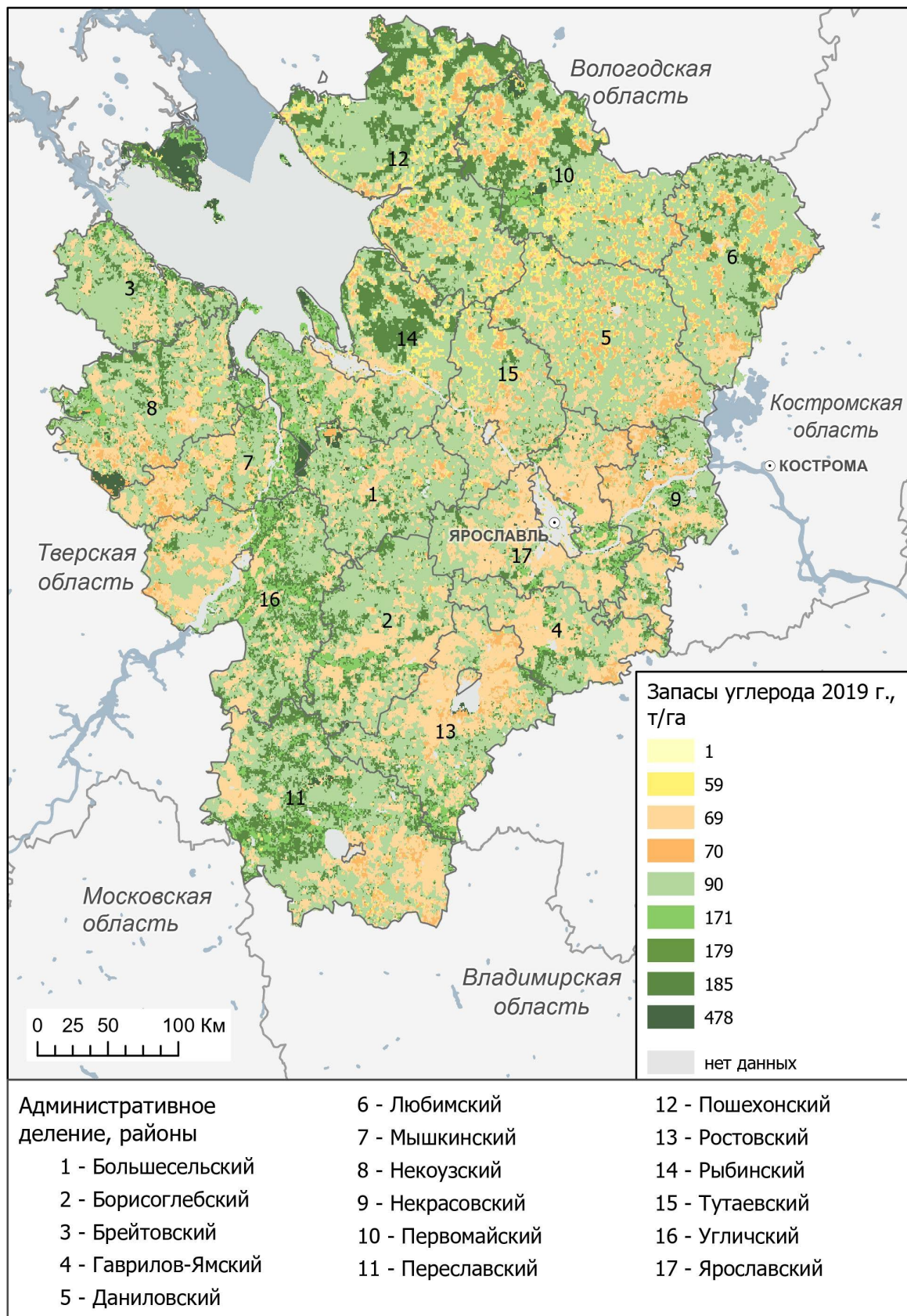


Рисунок 1. Расчетные запасы углерода в Ярославской области, 2019 г., т/га (рассчитано в InVEST, визуализировано в ArcGIS)

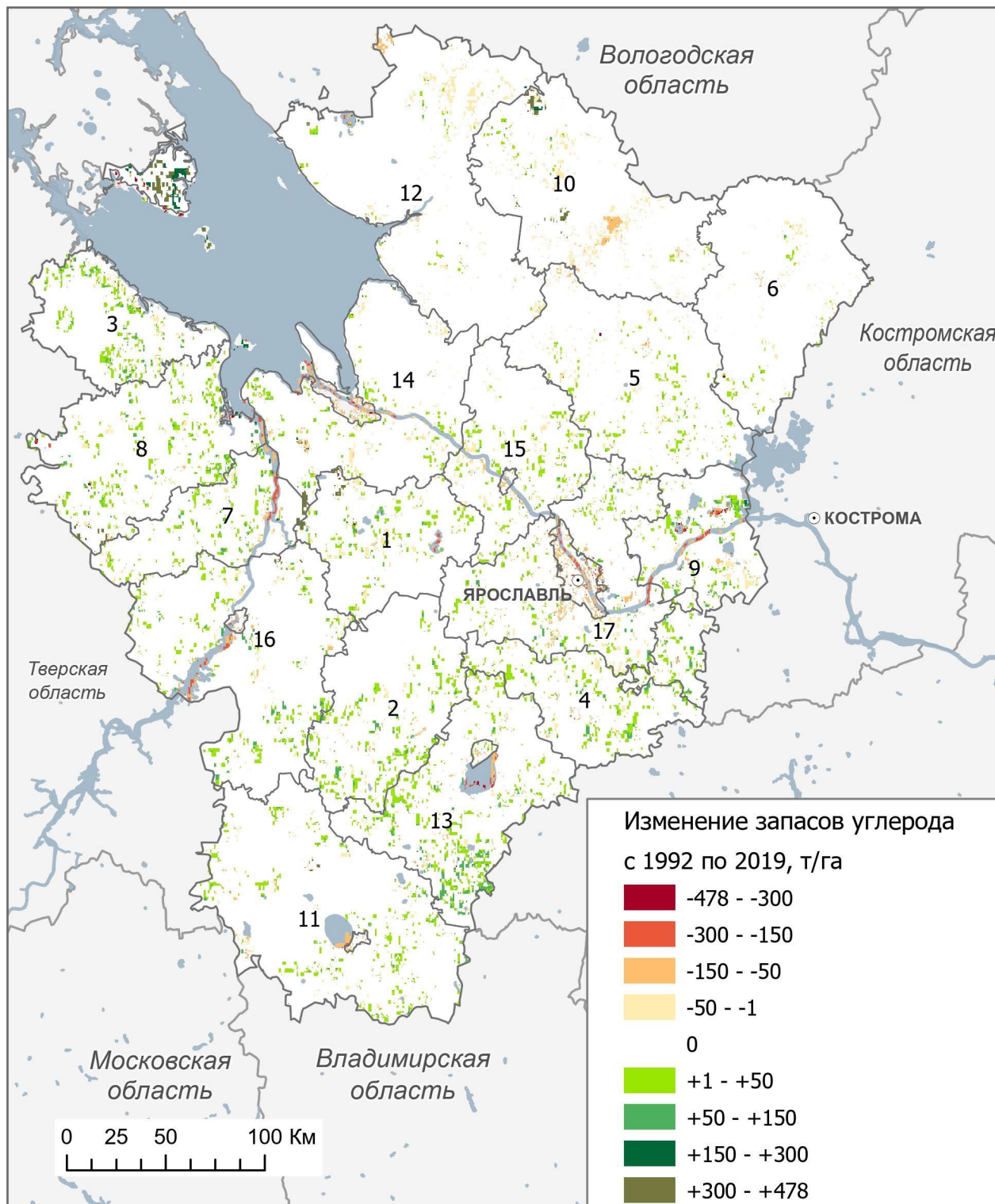


Рисунок 2. Изменение запасов углерода в Ярославской области за период 1992-2019 гг. (рассчитано в InVEST, визуализировано в ArcGIS)
Обозначение административных районов дано на рис. 1

Параллельная работа с данными в ArcGIS и обработка выгруженной атрибутивной таблицы в MS Excel позволили получить данные запасов для каждого класса землепользования, а также выявить и проанализировать связи между трансформацией наземного покрова и запасами углерода (по типам переходов и процессам).

Структура запасов по классам землепользования следующая: в лесах Ярославской области аккумулировано 73%

от общих запасов, или 245 млн т С (суммарно в четырех резервуарах), в пашнях и лугах – около 20% (65 млн т), в болотах – 5% (19 млн т) (рис. 3). Полученные результаты по запасам углерода в лесах близки к данным, представленным в Национальном докладе о кадастре 2021 г., согласно которым в управляемых лесах Ярославской области сосредоточено 242.5 млн т С. (Национальный доклад..., 2021).

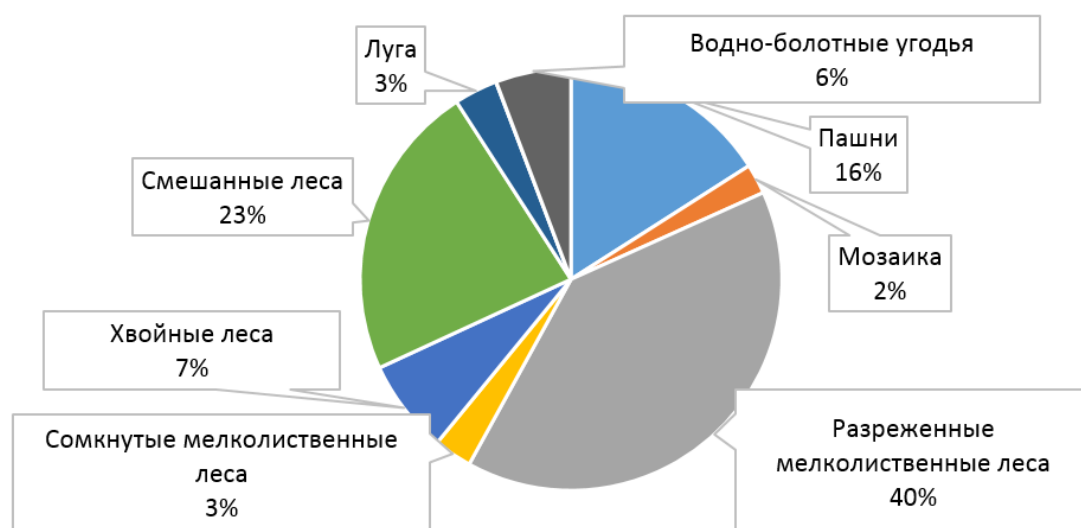


Рисунок 3. Запасы углерода в наземных экосистемах Ярославской области, по классам землепользования, % от общих рассчитанных запасов по области, 2019 г.

Расчеты запасов углерода для каждого типа перехода позволили нам сделать вывод о том, что прирост запасов углерода 5.66 млн тонн за 27 лет обусловлен прежде всего нетто-залесением (увеличением площади лесов в области), а

также заболачиванием некоторых участков. В таблице 2 представлены изменения в наземном покрове (переходы из одного класса в другой), приведшие к изменениям в запасе углерода на $\geq |100|$ тыс. тонн, в порядке убывания величины.

Таблица 2. Изменение запасов углерода вследствие трансформации наземного покрова Ярославской области за период 1992–2019 гг.

Трансформация наземного покрова, по типам переходов из класса <i>x</i> в класс <i>y</i>		Пло- щадь, км ²	Изменение запасов С, тыс. тонн
1992	2019		
Мозаика	Разреженные мелколиственные леса	773	+2381.4
Мозаика	Смешанные леса	91	+1145.7
Разреженные мелколиственные леса	Водно-болотные угодья	54	+940.9
Мозаика	Сомкнутые мелколиственные леса	77	+926.1
Пашни	Разреженные мелколиственные леса	412	+844.6
Мозаика	Хвойные леса	55	+616.0
Пашни	Смешанные леса	26	+304.7
Мозаика	Водно-болотные угодья	10	+207.5
Смешанные леса	Водно-болотные угодья	24	+191.8
Пашни	Редкостойные хвойные леса	14	+146.9
...
Хвойные леса	Пашни	10	-100.1
Водно-болотные угодья	Хвойные леса	3	-104.2
Разреженные мелколиственные леса	Луга	55	-107.4
Смешанные леса	Мозаика	12	-151.3
Смешанные леса	Разреженные мелколиственные леса	20	-188.7
Водно-болотные угодья	Разреженные мелколиственные леса	5	-198.5
Смешанные леса	Пашни	30	-346.5
Разреженные мелколиственные леса	Мозаика	126	-386.6
Разреженные мелколиственные леса	Пашни	290	-595.3

Залесение в Ярославской области было связано с зарастанием деревьями участков с мозаичным наземным покровом (разреженными и сомкнутыми мелколиственными лесами, а также смешан-

ными и даже хвойными, но на существенно меньшей площади), что являлось, по-видимому, частью сукцессионного процесса восстановления нарушенных лесных ландшафтов, а также, след-

ствием забрасывания сельскохозяйственных угодий. Такие участки, как правило, примыкают к пахотным участкам, являются их окраинами. Так, молодые мелколиственные березово-осиновые леса расширили свои площади в Борисоглебском, Гаврилов-Ямском и Некоузском районах. Пример роста лесной площади со смешанным хвойно-мелколиственным древостоем – южная часть Ростовского района, а также локальные участки недалеко от города Гаврилов-Ям. В результате такого увеличения лесной площади в области запасы углерода в экосистемах выросли на 5 млн тонн (табл. 2, рис. 2).

Также залесение происходило на месте бывших пахотных угодий, что привело к накоплению в них еще 1.3 млн тонн углерода. Согласно данным официальной статистики, в Ярославской области сохраняется тенденция сокращения посевных площадей: за 1990–2017 гг. они сократились в 2.4 раза (Доклад о состоянии..., 2019).

Немалый вклад в накопление углерода наземными экосистемами (плюс 1.3 млн тонн за 27 лет) вносят и процессы заболачивания мелколиственных и смешанных лесов, а также мозаичного наземного покрова. Процесс расширения вод-

но-болотных угодий на месте разреженных мелколиственных лесов приурочен к болотам Солодихинское (Некоузский район, на границе с Тверской областью), Шалимовское и Великий Мох (Мышкинский и Большесельский районы), Соколье и Новленское (Первомайский район) и болота Дарвинского заповедника (рис. 2). Увеличение площади заболоченных земель связано, по-видимому, как с природными процессами, так и с прекращением работ по реконструкции и эксплуатации мелиоративных систем и выводу из строя осушительной сети вследствие ее зарастания (Доклад о состоянии..., 2020).

Сокращение запасов углерода происходило вследствие распашки (полной и частичной) участков с бывшими разреженными мелколиственными лесами и смешанными лесами. Такие процессы наблюдались на площади около 450 км² (рис. 2), и, согласно используемому в исследовании подходу и данным о запасах углерода, явились основной причиной сокращения запасов углерода в ряде районов Ярославской области за рассматриваемый период. Перспективным в данном случае можно считать применение щадящих методов земледелия и использование в оценках уточненных, локальных данных о потоках углерода при таких методах землепользования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инструментарий InVEST и доступные геопространственные данные по наземному покрову были применены для оценки изменений запасов углерода вследствие трансформации землепользования в Ярославской области. Они могут быть использованы на аналогичных территориях Европейской части России. При необходимости возможно применение и других модулей InVEST для проведения стоимостных оценок поглощения углерода и оценки других экосистемных услуг. В 2019 г. общие запасы углерода в экосистемах Ярославской области составили около 337.4 млн тонн. 73% от общих запасов углерода аккумулировано в лесных экосистемах (в резервуарах фитомассы и почвы), в пашнях, пастбищах и лугах – около 20%, в болотах – 5%.

Полученный результат можно считать ориентировочным, т.к. величины запасов углерода в пулах даются в литературе с достаточно большим диапазоном значений, и выбор данных по плотности углерода по классам наземного покрова влияет на полученные расчетные значения запасов углерода и их динамики. В ряде случаев наши расчеты оказались близки к оценкам баланса углерода, выполненным ранее. Например, получен-

ные оценки запасов углерода в лесах соответствуют данным по Ярославской области Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов (2021).

Установленные направления трансформации землепользования за 27-летний период в целом соответствуют общим тенденциям изменения земельного фонда Ярославской области. За период 1992-2019 гг. изменений в наземном покрове коснулось 2.4 тыс. км², или 6.8 % области. Это привело к росту запасов углерода в наземных экосистемах на 5.66 млн тонн, главными факторами которого являются увеличение лесных площадей (на 960 км²), а также не столь значительное по площади, однако существенное с точки зрения объема запасов углерода расширение водно-болотных угодий (на 80 км²). Обозначенные процессы привели к увеличению запасов углерода в экосистемах Ярославской области на 1%.

Поскольку данные по плотности углерода по пулам были получены из литературных источников, основанных на разных методах оценки и периодах обследования, подходы в их применении для использования в региональных оценках (в т.ч. в InVEST) требуют дальнейшей проработки. Верификация данных по за-

пасам углерода возможна на основе более детальных обследований по ключевым участкам в пределах типичных экосистем, на основе расчетов по космическим снимкам индексов, отражающих биологическую продукцию, путем привязки к почвенно-географическим картам и т.п.

Выявленные тенденции изменений землепользования и динамики запасов углерода в разных классах наземного покрова/типах экосистем создают основу для разработки регионально-ориентированных рекомендаций для сокращения выбросов и увеличения поглощения парниковых газов управляемыми экосистемами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121040100322-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Н. Н., Климанова О. А., Хазиева Е.

С. Глобальные базы данных земельного покрова и перспективы их использования для картографирования современных ландшафтов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С.

110–123. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-110-123

Атлас Ярославской области. География.

История. М.: Изд-во ДИК, 1999. 48 с.

Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Ис-

аев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е.,

Уваров И. А. Спутниковое картогра-

фирование растительного покрова

России по данным спектрорадио-

метра MODIS // Современные про-

блемы дистанционного зондирова-

ния Земли из космоса. 2011. Т. 8. №

4. С. 285–302

Государственный доклад «О состоянии и

об охране окружающей среды Рос-

сийской Федерации в 2019 году».

URL: <https://clck.ru/3DS5X9> (дата

обращения 31.01.2024).

Гуля А. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л.

Ш., Алахвердиев Ф. Д. Комплексный

подход к оценке изменений в земле-

пользовании и их влияния на дина-

мику углерода в горных ландшаф-

тах Чеченской Республики // Изве-

стия Дагестанского государствен-

ного педагогического университета.

Серия Естественные и точные науки.

2021. Т. 15, № 4. С. 39–52. DOI:

10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52

Доклад о состоянии и использовании зе-

мель в Ярославской области в 2019

году. Управление Росреестра по

- Ярославской области. Ярославль, 2020. 72 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Ярославской области в 2017 г. / Департамент охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области; под научной редакцией Г. А. Фоменко. Ярославль, 2019. 232 с.
- Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Каганов В. В.* Натурная и модельная оценки углерода валежа в лесах Костромской области // *Лесоведение*. 2013. № 4. С. 3–11.
- Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Краев Г. Н.* Региональная оценка бюджета углерода лесов (РОБУЛ). Версия 1.1. М.: ЦЭПЛ РАН, 2011. URL: www.cepl.rssi.ru/regional.htm (дата обращения 24.10.2023).
- Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Честных О. В.* Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // *Вопросы лесной науки*. 2018. Т. 1 (1). С. 1–24. DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24
- Иванов А. Л., Савин И. Ю., Столбовой В. С., Духанин Ю. А., Козлов Д. Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева*. 2021. Вып. 108. С. 175–218. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-175-218
- Информационная система «Почвенно-географическая база данных». URL: <https://soil-db.ru/> (дата доступа 31.01.2024)
- Карелин Д. В., Горячкин С. В., Кудиков А. В., Лунин В. Н., Долгих А. В., Люри Д. И.* Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // *Почвоведение*. 2017. № 5. С. 580–594. DOI: 10.7868/S0032180X17050070
- Коломыц Э. Г.* Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука, 2020. 424 с.
- Космическая обсерватория: Леса России из космоса. URL: <http://carbon.cepl.rssi.ru/maps/> (дата обращения 15.03.2024).
- Леса высокой природоохранной ценности. Ярославская область. 2023. URL: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-yaroslavl> (дата обращения 14.10.2023).

Малышева Н. В., Золина Т. А., Дедова В. Ю.

Оценка накопления углерода лесами России: геопространственный аспект // Материалы Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС. Т. 1. М.: Изд. дом МГУ, 2017. С. 373–382.

Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 N 20-р. URL: <https://clck.ru/3DS5ds> (дата обращения 31.01.2024)

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть 2. Приложения. М.: Росгидромет. 2021. 91 с.

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. Часть 1. М.: Росгидромет, 2023. 468 с.

Парижское соглашение. 2015. URL: clck.ru/Tvr74 (дата обращения 01.05.2024).

Романовская А. А., Коротков В. Н., Смирнов

Н. С., Карabanь Р. Т., Трунов А. А. Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000–2011 гг. // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 5–18.

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Хаяма: МГЭИК, 2006. 258 с.

Рыжова И. М., Ерохова А. А., Подвезенная М. А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1426. DOI: 10.7868/S0032180X14090111

Сорокина Д. Д., Птичников А. В., Романовская А. А. Сравнительный анализ и оценка методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 4. С. 497–511. DOI: 10.31857/S2587556623040131

Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с

- низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р.
- Уфимцев В. И., Андроханов В. А.* Особенности накопления фитомассы в лесных насаждениях на отвалах Листвянского угольного разреза // Научные известия. 2022. № 29. С. 152–156.
- Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А.* Влияние исторических и региональных особенностей землепользования на величину и структуру запасов углерода в южной тайге и лесостепи европейской России // Почвоведение. 2018. № 6. С. 747–758. DOI: 10.7868/S0032180X18060114
- Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А.* Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350. DOI: 10.31857/S0032180X20030028
- Честных О. В., Грабовский В. И., Замолодчиков Д. Г.* Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с использованием баз данных почвенных характеристик // Лесоведение. 2022. № 3. С. 227–238.
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г.* Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
- Dampha N. K.* Change detection (1985–2020): Projections on land-use land cover, carbon storage, sequestration, and valuation in Southwestern Gambia // Sustainable Environment. 2021. Vol. 7. No. 1. Article number 1875556. DOI: 10.1080/23311843.2021.1875556
- Fernandes M. M., Fernandes M. R. M., Garcia J. R., Matricardi E. A., de Almeida A. Q., Pinto A. S., Menezes R.* Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030 // Land use policy. 2020. Vol. 99. Article 104795.
- Fryer J., Williams I. D.* Regional carbon stock assessment and the potential effects of land cover change // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 775. P. 145815.
- Ghosh S., Dinda S., Chatterjee N. D., Dutta S., Bera D.* Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using Pressure-Sensitivity-Resilience framework: An approach towards achieving low carbon cities // Journal of

- Cleaner Production. 2022. Vol. 336. Article number 130417. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130417
- Han J., Zhou X., Xiang W. N.* Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management // *Acta Ecologica Sinica*. 2016. No. 36 (4). P. 1152–1161.
- Lahiji R. N., Dinan N. M., Liaghati H., Ghaffarzadeh H., Vafaeinejad A.* Scenario-based estimation of catchment carbon storage: Linking multi-objective land allocation with InVEST model in a mixed agriculture-forest landscape // *Frontiers of Earth Science*. 2020. Vol. 14. P. 637–646. DOI: 10.1007/s11707-020-0825-1
- Lai S., Eladawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q.* Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 140. Article number 108982. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108982
- Li J., Dong S., Li Y., Wang Y., Li Z., Li F.* Effects of land use change on ecosystem services in the China–Mongolia–Russia economic corridor // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 360. Article number 132175. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132175
- Natural Capital Project. InVEST. URL: <https://clck.ru/3DS5Xv> (дата обращения 01.06.2023).
- Niu Z., He H., Peng S., Ren X., Zhang L., ... & Liu W.* A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021. Vol. 13. Article number e2020MS002451. DOI: 10.1029/2020MS002451
- The European Space Agency. MRLC maps series from 1992 onwards (v207 and v2.1.1). URL: <https://clck.ru/3DS5Zj> (дата обращения 05.07.2023).
- Wang Y., Sun Y., Cao X., Wang Y., Zhang W., Cheng X.* A review of regional and Global Scale Land Use/Land Cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. Vol. 206. P. 311–334.
- Winkler K., Yang H., Ganzenmüller R., Ceccherini G., Duveiller G., Grassi G., Pongratz J., Bastos A., Shvidenko A., Araza A., Herold M., Wigneron J.-P., Ciais Ph.* Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink // *Communications Earth & Environment*. 2023. No 4. Article number 237. DOI: 10.1038/s43247-023-00893-4

Xiang H., Jia M., Wang Z., Li L., Mao D., Zhang D., Cui G., Zhu W. Impacts of Land Cover Changes on Ecosystem Carbon Stocks Over the Transboundary Tumen River Basin in Northeast Asia // *Chinese Geographical Science*, 2018. Vol. 28(6). P. 973–985. DOI: 10.1007/s11769-018-1006-y

Zeng L., Liu X., Li W., Ou J., Cai Y., Chen G., Li M., Li G., Zhang H., Xu X. Global simulation of fine resolution land use/cover change and estimation of aboveground biomass carbon under the shared socio-economic pathways // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 312. Article 114943. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114943

Zhang F., Xu N., Wang C., Wu F., Chu X. Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2020. Vol. 120. Article number. 102948. DOI: 10.1016/j.pce.2020.102948

REFERENCES

Alekseeva N. N., Klimanova O. A., Haziieva E. S., Global'nye bazy dannyh zemel'nogo pokrova i perspektivy ih ispol'zovanija dlja kartografirovanija sovremennyh landshaftov (Global Land Cover Data

Bases and their Perspectives for Present-Day Landscapes Mapping), *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*, 2017, No 1, pp. 110–123. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-110-123

Atlas Jaroslavskoj oblasti. Geografija. Istorija (Atlas of Yaroslavl region. Geography, History), Moscow: Izd-vo DIK, 1999, 48 p.

Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaja M. A., Ocenka zapasov organicheskogo ugleroda lesnyh pochv v regional'nom masshtabe (Estimation of Organic Carbon Stocks of Forest Soils on a Regional Scale), *Pochvovedenie*, 2020, No 3, pp. 340–350.

Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaja M. A., Vlijanie istoricheskikh i regional'nyh osobennostej zemlepol'zovanija na velichinu i strukturu zapasov ugleroda v juzhnoj tajge i lesostepi evropejskoj Rossii (The Influence of Historical and Regional Characteristics of Land Use on the Value and Structure of Carbon Stocks in the Southern Taiga and Forest-Steppe of European Russia), *Pochvovedenie*, 2018, No 6, pp. 747–758.

Chestnyh O. V., Grabovskij V. I., Zamolodchikov D. G., Ocenka zapasov poch-

- vennogo ugleroda lesnyh rajonov Ros-sii s ispol'zovaniem baz dannyh poch-vennyh harakteristik (Estimate of the Soil Carbon Stock of Russia's Forested Regions Using the Soil Properties Data-bases), *Lesovedenie*, 2022, No 3, pp. 227–238.
- Dampha N. K., Change detection (1985–2020): Projections on land-use land cover, carbon storage, sequestration, and valuation in Southwestern Gambia, *Sustainable Environment*, 2021, Vol. 7, No 1, Article number 1875556, DOI: 10.1080/23311843.2021.1875556
- Doklad o sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Yaroslavskoj oblasti v 2017 g. (Report on the state and protection of the environment of the Yaroslavl region in 2017), Yaroslavl, 2019, 232 p.
- Fernandes M. M., Fernandes M. R. M., Garcia J. R., Matricardi E. A., de Almeida A. Q., Pinto A. S., Menezes R., Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Ser-gipe semiarid region, Brazil: 1992–2030, *Land use policy*, 2020, Vol. 99, Article number 104795.
- Fryer J., Williams I. D., Regional carbon stock assessment and the potential effects of land cover change, *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 775, Article number 145815
- Ghosh S., Dinda S., Chatterjee N. D., Dutta S., Bera D., Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using Pressure-Sensitivity-Resilience framework: An approach towards achieving low carbon cities, *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 336, Article number 130417. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130417
- Gunja A. N., Gajrabekov U. T., Mahmudova L. Sh., Alahverdiev F. D., Kompleksnyj podhod k ocenke izmenenij v zemlepol'zovanii i ih vlijaniya na dinamiku ugleroda v gornyh landshaftah Chenchenskoj Respubliki (A Complex Approach to Land Use Change Assessment and its Impact on Carbon Dynamics in Mountain Landscapes of the Chechen Republic), *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Serija Estestvennye i tochnye nauki*, 2021, Vol. 15, No 4, pp. 39–52.
- Han J., Zhou X., Xiang W. N., Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management, *Acta Ecologica Sinica*, 2016, Vol. 36 (4), pp. 1152–1161.

- Informacionnaya sistema «Pochvenno-geograficheskaya baza dannyh» (Information system «Soil-geographical database»), available at: www.soil-db.ru (January 31, 2024).
- Ivanov A. L., Savin I. Ju., Stolbovoj V. S., Duhanin Ju. A., Kozlov D. N., Metodologicheskie podhody formirovanija edinoj Nacional'noj sistemy monitoringa i ucheta balansa ugleroda i vybrosov parnikovyh gazov na zemljah sel'skoho-zajstvennogo fonda Rossijskoj Federacii (Methodological Approaches to the Formation of a Unified National System of Monitoring and Accounting of Carbon Balance and Greenhouse Gas Emissions on Lands of the Agricultural Fund of the Russian Federation), *Bulleten' Pochv. instituta im. V. V. Dokuchaeva*, 2021, No. 108, pp. 175–218, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-175-218
- Karelin D. V., Gorjachkin S. V., Kudikov A. V., Lunin V. N., Dolgih A. V., Ljuri D. I., Izmenenie zapasov ugleroda i jemissii CO₂ v hode postagrogennoj sukcesii rastitel'nosti na seryh pochvah v Evropejskoj chasti Rossii (Changes in Carbon Stocks and CO₂ Emissions during Postagrogenic Vegetation Succession on Gray Soils in the European part of Russia), *Pochvovedenie*, 2017, No 5, pp. 580–594, DOI: 10.7868/S0032180X17050070
- Kolomyc Je. G. *Uglerodnyj balans i ustojchivost' lesnyh jekosistem pri global'nyh izmenenijah klimata. Jekologicheskie resursy boreal'nyh lesov* (Carbon Balance and Sustainability of Forest Ecosystems under Global Climate Change. Ecological Resources of the Boreal Forests), Moscow: Nauka, 2020, 424 p.
- Kosmicheskaja observatorija: Lesa Rossii iz kosmosa, available at: <http://carbon.cepl.rssi.ru/maps/> (2024, 15 March).
- Lahiji R. N., Dinan N. M., Liaghati H., Ghaffarzadeh H., Vafaeinejad A., Scenario-based estimation of catchment carbon storage: Linking multi-objective land allocation with InVEST model in a mixed agriculture-forest landscape, *Frontiers of Earth Science*, 2020, Vol. 14, pp. 637–646, DOI: 10.1007/s11707-020-0825-1
- Lai S., Eladawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q., Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia, *Ecological Indicators*, 2022, Vol. 140, Article 108982.
- Lesa vysokoj prirodoohrannoju cennosti, Yaroslavskaya oblast', 2023 (Forests of

- high conservation value, Yaroslavl region, 2023), available at: www.hcvf.ru/ru/maps/hcvf-yaroslavl (October 14, 2023).
- Li J., Dong S., Li Y., Wang Y., Li Z., Li F., Effects of land use change on ecosystem services in the China–Mongolia–Russia economic corridor, *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 360, Article number 132175, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132175
- Malysheva N. V., Zolina T. A., Dedova V. Ju., Ocenka nakopleniya ugleroda lesami Rossii: geoprostranstvennyj aspekt (Estimation of Carbon Sequestration by Russian Forests: Geospatial Issue), *International conference InterCarto. InterGIS, Proc.Conf*, Moscow: Izd. dom MGU, 2017, Vol. 1, pp. 373–382.
- Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu ob"ema pogloshcheniya parnikovyh gazov (Guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas absorption volumes), *Rasporyazhenie Minprirody Rossii* ot 30.06.2017 N 20-p, available at: <https://clck.ru/3DS6Bw> (January 31, 2024).
- Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990–2019 gg. (National inventory of anthropogenic emissions from sources and absorption by greenhouse gases by pollutants not regulated by the Montreal Protocol for 1990–2019), Chast' 2, Prilozheniya, Moscow: Roshydromet, 2021, 91 p.
- Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990–2021 gg. (National inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2021) Chast' 1, Moscow: Roshydromet, 2023, 468 p.
- Natural Capital Project. InVest, available at: <https://clck.ru/3DS5Xv> (2023, 1 June).
- Niu Z., He H., Peng S., Ren X., Zhang L., ... & Liu W., A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, Vol. 13, Article number e2020MS002451, DOI: 10.1029/2020MS002451
- Parizhskoe soglasenie (The Paris Agreement), 2015, available at: clck.ru/Tvr74 (May 01, 2024).

- Romanovskaja A. A., Korotkov V. N., Smirnov N. S., Karaban' R. T., Trunov A. A., Ocenka vkladа zemlepol'zovanija v antropogennuju jemissiju parnikovyh ga-zov na territorii Rossii v techenie 2000–2011 gg. (Assessment of the Contribution of Land use to Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions in Russia during 2000–2011), *Meteorologija i gidrologija*, 2014, No 3, pp. 5–18.
- Rukovodjashhie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov MGJeIK*, Vol. 4. Sel'skoe hozjajstvo, lesnoe hozjajstvo i drugie vidy zemlepol'zovanija (IPCC Program on National Greenhouse Gas Inventories. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories), Hajama: MGJeIK, 2006, 258 p.
- Ryzhova I. M., Erohova A. A., Podvezennaja M. A., Dinamika i struktura zapasov ugleroda v postagrogennyh jekosistemah juzhnoj tajgi (Dynamics and Structure of Carbon Stocks in Postagrogenic Ecosystems of the Southern Taiga), *Pochvovedenie*, 2014, No. 12, pp. 1426–1426.
- Shhepashhenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (Organic Carbon Stock in Russian Soils), *Pochvovedenie*, 2013, No 2, pp. 123–132.
- Shvidenko A. Z., Shhepashhenko D. G., Uglerodnyj bjudzhet lesov Rossii (Carbon Budget of Russian Forests), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2014, No 1, pp. 69–92.
- Sorokina D. D., Ptichnikov A. V., Romanovskaja A. A., Sravnitel'nyj analiz i ocenka metodik rascheta pogloshhenija parnikovyh gazov lesnymi jekosistemami, primenjaemyh v Rossijskoj Federacii (Comparative Analysis and Evaluation of Methods for Calculating the Absorption of Greenhouse Gases by Forest Ecosystems Applied in the Russian Federation), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2023, Vol. 87, No 4, pp. 497–511.
- Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda (Strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050), *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii*, No 3052-r, October 29, 2021.
- The European Space Agency. MRLC maps series from 1992 onwards (v207 and v2.1.1), available at: <https://clck.ru/3DS5Zj> (2023, 5 July)
- Ufimcev V. I., Androhanov V. A., Osobennosti nakoplenija fitomassy v lesnyh nasa-zhdenijah na otvalah Listvjanskogo

- ugol'nogo razreza (Features of Phytomass Accumulation in Forest Plantations on the Dumps of the Listvyansky Coal Mine), *Nauchnye izvestija*, 2022, No. 29, pp. 152–156.
- Wang Y., Sun Y., Cao X., Wang Y., Zhang W., Cheng X., A review of regional and Global Scale Land Use/Land Cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing, *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, Vol. 206, p. 311–334, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.11.014.
- Winkler K., Yang H., Ganzenmüller R., Ceccherini G., Duveiller G., Grassi G., Pongratz J., Bastos A., Shvidenko A., Araza A., Herold M., Wigneron J.-P., Ciais Ph., Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink, *Communications Earth & Environment*, 2023, No 4, Article number 237, DOI: 10.1038/s43247-023-00893-4
- www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady (January 31, 2024).
- Xiang H., Jia M., Wang Z., Li L., Mao D., Zhang D., Cui G., Zhu W., Impacts of Land Cover Changes on Ecosystem Carbon Stocks Over the Transboundary Tumen River Basin in Northeast Asia, *Chinese Geographical Science*, 2018, Vol. 28(6), pp. 973–985, DOI: 10.1007/s11769-018-1006-y
- Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Chestnyh O. V. Dinamika balansa ugleroda v lesah federal'nyh okrugov Rossijskoj Federacii (Dynamics of the Carbon Budget of Forests of Federal Districts of Russian Federation), *Voprosy lesnoj nauki*, 2018, Vol. 1 (1), pp. 1–24, DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24
- Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Kaganov V. V., Naturnaja i model'naja ocenki ugleroda vlezha v lesah Kostromskoj oblasti (Natural and Model Assessment of Carbon Pool in Slash of Forests in Kostroma Region), *Lesovedenie*, 2013, No 4, pp. 3–11.
- Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Kraev G. N., *Regional'naja ocenka bjudzheta ugleroda lesov (ROBUL). Versija 1.1.* (Assessment of Carbon Budget of Forests at Regional Scale (ROBUL). Version 1.1.), Moscow, CFEP RAN, 2011.
- Zeng L., Liu X., Li W., Ou J., Cai Y., Chen G., Li M., Li G., Zhang H., Xu X., Global simulation of fine resolution land use/cover change and estimation of aboveground biomass carbon under the shared socioeconomic pathways, *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 312, Article number 114943.

Zhang F., Xu N., Wang C., Wu F., Chu X., Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive ma-

agement in Shanghai, China, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, Vol. 120, Article number 102948.

ASSESSMENT OF CARBON BALANCE CHANGE OF THE YAROSLAVL REGION AS A RESULT OF LAND USE TRANSFORMATION

A. I. Bancheva*, N. N. Alekseeva, D. A. Tretyachenko, Yu. S. Grinfeldt

*Lomonosov Moscow State University
Leninskiye Gori 1, Moscow, 119991, Russia*

*E-mail: ban-sai@mail.ru

Received: 07.02.2024

Revised: 28.04.2024

Accepted: 03.05.2024

Land use change is an important factor to consider in carbon emissions estimates, and quantification of changes in carbon flows and stocks in the “Land Use, Land Use Change and Forestry” sector is largely less reliable than emissions’ assessments from stationary sources and transport. The purpose of the research is to test the methodology for regional assessment of carbon stocks of ecosystems and their transformation under the land use/land cover change (based on the example of the Yaroslavl region). We used available European Space Agency spatial land cover data and publications on carbon density of major reservoirs of terrestrial ecosystems. Calculations were carried out in InVEST, ArcGIS, MS Excel. It was revealed that for 1992–2019 changes in land cover affected 6.8% of the region's area. About 337.4 million tons of carbon were accumulated in the ecosystems of the Yaroslavl region, the dynamics of reserves is positive, which is explained by an increase in the areas of forests and wetlands. About 73% of the total carbon reserves are accumulated in forest ecosystems, about 20% – in arable lands, pastures and meadows, 5% – in swamps. Trends in land use change and carbon stock dynamics within land cover classes/ecosystem types should be taken into account for developing regional-level recommendations for ecosystem management to reduce emissions and increase carbon sequestration.

Keywords: *carbon stock, Russia, greenhouse gases, netto-emissions, climate change, InVEST, low-carbon*