

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 911.52

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА В 1992–2020 гг.

Д.А. Третьяченко¹, О.А. Климанова², Н.Н. Алексеева³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии мира и геоэкологии*

¹ *Инженер; e-mail: daria.trt@gmail.com*

² *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: oxkl@yandex.ru*

³ *И. о. зав. кафедрой, доц., канд. геогр. наук; e-mail: nalex01@mail.ru*

Происходящая вследствие роста антропогенной нагрузки трансформация землепользования и наземного покрова является одним из наиболее важных факторов глобальных изменений окружающей среды. Многочисленные исследования по данной тематике выполнены в глобальных, континентальных, страновых масштабах, а также для отдельных регионов и городов. Значительно реже динамика наземного покрова и обусловленные ею процессы изучаются в природно-зональных границах. В то же время именно такой подход позволяет определить направленность геоэкологических процессов, обусловленных изменениями землепользования, на зональном уровне. В связи с этим цель статьи – определение значимых направлений трансформации наземного покрова на глобальном уровне за тридцатилетний период (1992–2020) в границах экологических зон. В качестве источника использованы геопространственные данные «Инициативы по изменению климата» Европейского космического агентства ESA CCI LC. Исследование включало несколько этапов: 1) инвентаризацию и картографирование ареалов изменений и типов переходов между разными категориями наземного покрова за 1992–2020 гг. для 20 экологических зон (база данных включает 11 тыс. ареалов, охарактеризованных по семи параметрам: тип перехода, кодировка процесса, исходный и конечный тип наземного покрова, количество ячеек, количество ареалов, площадь ареала); 2) группировку выявленных 867 типов переходов по процессам трансформации и анализ проявления процессов в каждой из экологических зон; 3) оценку направленности выявленных изменений и их возможных геоэкологических последствий. В результате определены основные геоэкологические процессы трансформации наземного покрова, установлена их зональная специфика, в том числе различия их проявления в лесных и безлесных зонах, в пределах горных систем различных поясов. Установлено, что около 17% территорий с измененным наземным покровом характеризуются снижением или утратой биологической продуктивности, которые являются следствием опустынивания и обезлесивания земель, на 21% территорий произошло расширение площади антропогенно модифицированных и техногенных ландшафтов. Около трети всех изменений характеризуются процессами экореабилитации и восстановления экологического потенциала земель. Выявленные ареалы изменений могут рассматриваться как стадии динамичной перестройки природно-антропогенных систем и изменения их экосистемных функций, требующих более детального изучения.

Ключевые слова: экологические зоны, геопространственные данные, изменение землепользования, процессы трансформации, геоэкологические проблемы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.1

ВВЕДЕНИЕ

Происходящая вследствие роста антропогенной нагрузки трансформация землепользования и наземного покрова является одним из наиболее важных факторов глобальных изменений окружающей среды. Трансформация наземного покрова оказывает существенное влияние на динамику природно-антропогенных ландшафтов, ход экодинамических

и биогеохимических процессов, устойчивость к внешним воздействиям, в том числе к изменению климата. Кроме того, сдвиги в землепользовании (массовая распашка, сведение лесов, опустынивание, застройка и создание техногенной инфраструктуры) рассматриваются как самостоятельный фактор потепления климата. Изучение землепользования и динамики наземного покрова в последнее

десятилетие стало важной составляющей многочисленных исследований в сфере оценки экологических услуг и сохранения экосистемного и биологического разнообразия [Niu et al., 2021; Li et al., 2022], основой для анализа региональных геоэкологических проблем (например, деградации земель, обезлесивания ландшафтов и т. п.) [Li et al., 2016; Potapov et al., 2022], разработки мер по адаптации к изменениям климата [Reinhart et al., 2022].

Многочисленные исследования трансформации землепользования выполняются на основе обработки данных дистанционного зондирования и глобальных баз геопространственных данных, позволяющих определять переходы классов наземного покрова за определенные периоды, местоположения с наибольшим динамизмом изменений и на этой основе выявлять доминирующие процессы/траектории развития природно-хозяйственных систем. Среди таких траекторий, имеющих глобальное и континентальное проявления, выделяют урбанизацию (расширение застроенных территорий), сведение лесов (это две доминирующие траектории), а также потерю и расширение сельскохозяйственных земель, опустынивание [Radwan et al., 2021].

За рубежом в науках об окружающей среде сформировалось отдельное научное направление, посвященное исследованиям изменений земель (Land change science) [Turner, et al., 2007], в рамках которого исследуются движущие силы изменений наземного покрова, возможные воздействия и потенциальные последствия динамики землепользования для природных и социально-экономических систем. Особое внимание уделяется картографированию этих изменений, которое рассматривается как ценный инструмент представления геопространственной информации для решения широкого спектра научных и прикладных экологических задач, в том числе планирования землепользования. Наукометрический анализ по тематике «Изменение землепользования/земельного покрова» с использованием баз данных Scopus, Web of Science и ScienceDirect за 1993–2022 гг. показал, что за этот период издано свыше 2700 научных статей, при этом ежегодный прирост исследований составляет 25% [Afuye et al., 2024]. В 2022 г. опубликовано свыше 560 статей. Лидерами научных исследований являются Китай и США (по количеству статей и общему цитированию).

Исследования трансформации наземного покрова и землепользования проводятся в глобальных, континентальных, страновых масштабах [Radwan et al., 2021; Chen et al., 2019], а также для отдельных регионов [Fernandez et al., 2020] и городских агломераций [Zhang et al., 2020]. В основном, в качестве операционных единиц выступают административно-территориальные образования, гораздо реже —

динамика наземного покрова и обусловленные ею процессы изучаются в границах природно-ландшафтных объектов.

Опыт применения глобальных баз данных по наземному покрову для анализа динамики природно-антропогенных ландшафтов поясов и зон имеется на кафедре физической географии мира и геоэкологии. Так, авторами использовалась карта «Географические пояса и зональные типы ландшафтов мира» (1988), позволившая получить географически привязанные данные о трансформации земной поверхности за 2001–2012 гг. на основе данных MODIS Land Cover в глобальном масштабе [Климанова и др., 2018], на уровне крупных регионов [Алексеева и др., 2019] и стран [Klimanova et al., 2017]. Установлено, что изучение динамики наземного покрова важно не столько для типологии и классификации современных ландшафтов, сколько для выявления экологически значимых трендов, обусловленных флуктуациями землепользования.

В данном исследовании динамика наземного покрова впервые соотносится с границами экологических зон, концепция которых была разработана ФАО ООН [Global Ecological..., 2012]. Под экологической зоной подразумевают область с относительно однородными природными растительными формациями, схожими по физиономическому облику. Границы экологических зон приблизительно совпадают с типами климата Кеппена-Треварта, разработанными с учетом термических показателей, количества и сезонности осадков. Тем самым по содержанию и критериям выделения они близки понятию «природная зона», принятому в отечественной физической географии. Всего выделяют 20 экологических зон, входящих в пять поясов (доменов) — тропический, субтропический, умеренный, бореальный, полярный, а также класс водных объектов. Большая часть экологических зон закономерно повторяется на материках, в каждом поясе выделяется по одной «горной зоне», которой соответствует понятие «спектр высотных зон». Экологические зоны фактически отражают генерализованную поясно-зональную дифференциацию суши земного шара на двух уровнях: поясном и зональном, без учета секторных закономерностей. Эта структура более упрощенная, чем схема поясно-зональной дифференциации, принятая в российской физической географии и ландшафтоведении [Романова и др., 2015]. Поскольку большинство мировых классификаций наземного покрова имеют достаточно обобщенный характер (не более 20 классов), это делает их сопоставление с глобальными экологическими зонами вполне корректным и дает представление о процессах трансформации экосистем на глобальном и зональном уровнях.

Цель статьи – определение значимых направлений трансформации наземного покрова мира на зональном уровне за период 1992–2020 гг. Выявленные ареалы с преобладающими направлениями трансформации наземного покрова в конкретных зонально-климатических условиях могут рассматриваться как стадии динамичной перестройки природно-антропогенных систем и изменения их экосистемных функций. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) выявление ареалов изменений и инвентаризация типов переходов между категориями наземного покрова; 2) группировка выявленных типов переходов по процессам трансформации и оценка степени их выраженности в границах экологических зон; 3) определение возможных геоэкологических последствий выявленных процессов трансформации наземного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по динамике наземного покрова глобального и регионального масштабов проводятся либо на основе дешифрирования разновременных космических снимков, либо с использованием готовых баз геопространственных данных по наземному покрову, которые получены на основе обработки ДДЗ с различных съемочных аппаратов и систем. Оба эти подхода имеют свои преимущества и недостатки. Возможности их использования для геоэкологических исследований рассмотрены в статье [Алексеева и др., 2017]. В случае использования тематических баз данных по наземному покрову следует учитывать ряд неопределенностей в итоговом наборе данных за длительный период, связанных с различными процедурами классификации, атмосферными возмущениями, а также изменениями спутниковых датчиков и алгоритмов получения космических изображений. Несоответствия между источниками данных могут также быть результатом ошибок, вызванных погрешностями географической привязки данных дистанционного зондирования или обобщением векторных карт [Castilla, Nau, 2007]. Это влияет на качество статистики как по отдельным классам наземного покрова, так и на соответствие многолетних наборов данных. Число баз данных постоянно увеличивается, в настоящее время в открытом доступе представлено около 60 глобальных и региональных баз по землепользованию и наземному покрову с разрешением от 1 км до 10 м и около 50 тематических продуктов [Wang et al., 2023].

Задаче выделения ареалов однотипных изменений землепользования за 30-летний период наиболее соответствуют данные, полученные в рамках проекта по наземному покрову «Инициативы по

изменению климата» Европейского космического агентства (ESA CCI LC), предоставляющего согласованные карты, начиная с 1992 г. в системе классификации наземного покрова (*Land Cover Classification System*) ФАО ООН. Классификация, принятая 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 (22 категории), в то время как другие базы данных, даже с большим пространственным разрешением, имеют вдвое меньшее число генерализованных категорий [Wang et al., 2023]. Данные ESA CCI LC проходят строгий процесс верификации (средняя общая точность карт за период 2016–2020 гг. оценивается в 70,82% (<https://ceos.org/gst/cci-lc.html>)) и регулярно обновляются. Используемые в работе данные имеют достаточно низкое пространственное разрешение 0,002778° (~300 м), что, с одной стороны, облегчает компьютерную обработку данных, а с другой – дает более генерализованную картину для глобального уровня, чем данные высокого разрешения (10, 30 м). Отметим, что 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].

Легенда карт ESA CCI LC включает 22 основных (в легенде индекс оканчивается на 0) и 15 дополнительных классов наземного покрова в отдельных, верифицированных специалистами регионах [The European Space..., 2024]. При этом эти дополнительные классы отражают процесс разделения основных в тех регионах, где это было возможным, т. е. на мировой карте одновременно присутствуют и основные, и дополнительные классы. Каждая из категорий имеет трехзначный индекс, в котором первая (для двузначных) или первые две (для трехзначных) цифры отражают основной класс.

В то же время указанный источник имеет и ряд недостатков. Так, для класса 220 (*вечные снега и ледники*) авторы базы данных наземного покрова использовали данные Randolph Glaciers Inventory, согласно которой эта категория остается неизменной в течение всего рассматриваемого периода [Product Quality..., 2024], что не вполне согласуется с другими данными (например, [National Snow and Ice Data Center, 2024]).

Обработка исходных данных проводилась в программном пакете ArcMap методом анализа наложения растров в несколько этапов. На этапе подготовки данных из растров наземного покрова

были удалены пиксели Мирового океана, которые не изменили своих значений за наблюдаемый период (5,6 млрд пикселей) (пиксели морей и океанов, которые участвовали в какой-либо трансформации, были сохранены). Это было сделано с целью уменьшения объема обрабатываемых значений. Также все пиксели водных объектов, находящиеся внутри континентов, были сохранены независимо от того, были они трансформированы или нет. Затем для каждого из типов наземного покрова была определена площадь в 1992 и 2020 гг., выявлены ареалы, подвергшиеся изменениям за указанный период, а также типы переходов между категориями наземного покрова, вызвавшие эти изменения. На этом этапе для каждого типа наземного покрова были выполнены картографические визуализации, позволившие как частично верифицировать результаты, так и выявить географию явлений.

Затем на получившийся растр изменений был наложен растр глобальных экологических зон, предварительно преобразованный из векторного формата. Сопоставление площадей итоговых растров выявило расхождение их площадей (–2,67% для всей суши земного шара в растре изменений), неизбежно связанное с технологией наложения. Максимальные расхождения площадей раstra глобальных экологических зон и изменений наземного покрова были отмечены для зон 41 (бореальные хвойные леса) и 42 (бореальные тундровые редколесья), минимальные – для зоны 25 (горные системы субтропического пояса). Отметим, что именно указанные ограничения обусловили выбор процентного соотношения площадей в пределах зон, а не абсолютных показателей в итоговом представлении результатов. На этом этапе были получены расчетные таблицы с данными о площади ареалов изменений и типов переходов в пределах каждой из глобальных экологических зон. Потом, исходя из содержания категорий легенды и географической приуроченности ареалов изменений, выявленные типы переходов были объединены в 24 процесса трансформации наземного покрова. В программе Excel рассчитана доля процессов в структуре изменений наземного покрова в каждой из экологических зон, а также проведено их обобщение, позволившее выявить основные направления изменений, имеющие сходные геоэкологические последствия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты: 1) карта и база данных ареалов изменений и типов переходов между разными категориями наземного покрова за 1992–2020 гг. для 20 экологических зон (включает 11 тыс. ареалов, охарактеризованных по семи значимым

параметрам: тип перехода, кодировка процесса, исходный и конечный типы наземного покрова, количество ячеек, количество ареалов, площадь ареала); 2) группировка выявленных 867 типов переходов по процессам трансформации и соотношению процессов в каждой из экологических зон; 3) оценка направленности выявленных процессов и их возможных геоэкологических последствий.

Рассмотрим особенности трансформации наземного покрова/землепользования в разных экологических зонах и на материках за последние 30 лет, а также основные процессы, обусловленные ими. На карте (рис. 1) красным цветом показаны ячейки, где за 1992–2020 гг. произошли изменения наземного покрова и, следовательно, изменились характер и интенсивность многих геоэкологических процессов. Содержание категорий наземного покрова и их индексы представлены в легенде к карте. Фон даны типы наземного покрова по состоянию на 2020 г. Природно-зональная дифференциация суши показана границами экологических зон с цифровыми индексами. Их кодировка представлена в соответствии с концепцией ФАО: первая цифра характеризует пояс (от 1 до 5), вторая – собственно зону.

Процессы трансформации наземного покрова по-разному проявились в глобальных экологических зонах. Наибольшие в процентном отношении изменения (до 9% площади зоны) произошли в пределах влажных тропических (дождевых) лесов (11) и бореальных тундровых редколесий (42), наименьшие – в зоне тропических пустынь (15) и практически повсеместно в пределах полярного пояса (50) (рис. 2). Последнее, как сказано выше, объясняется исходными данными, в которых не отражены изменения ледовой обстановки. В большинстве экологических зон изменения затронули 5–7% площади, практически вне зависимости от общих размеров зон, которые различаются на порядок. Так, площадь зоны 11 составляет чуть более 14 млн км², а зон 22 и 31 – 1,5 и 1,7 млн км² соответственно.

Полученные переходы классов наземного покрова были проанализированы и сгруппированы таким образом, чтобы выявить основные процессы трансформации. Под процессом трансформации наземного покрова ниже понимается совокупность типов переходов, объединенных по одному из трех принципов: 1) единая первоначальная категория наземного покрова; 2) единая конечная категория; 3) собственно содержание процесса трансформации в контексте состояния современных ландшафтов. К первой группе, например, было отнесено сведение лесной растительности на землях, ранее занятых лесами, ко второй – полная утрата растительности на месте различных категорий земель, к третьей – рост городских земель, распахка и т. д.

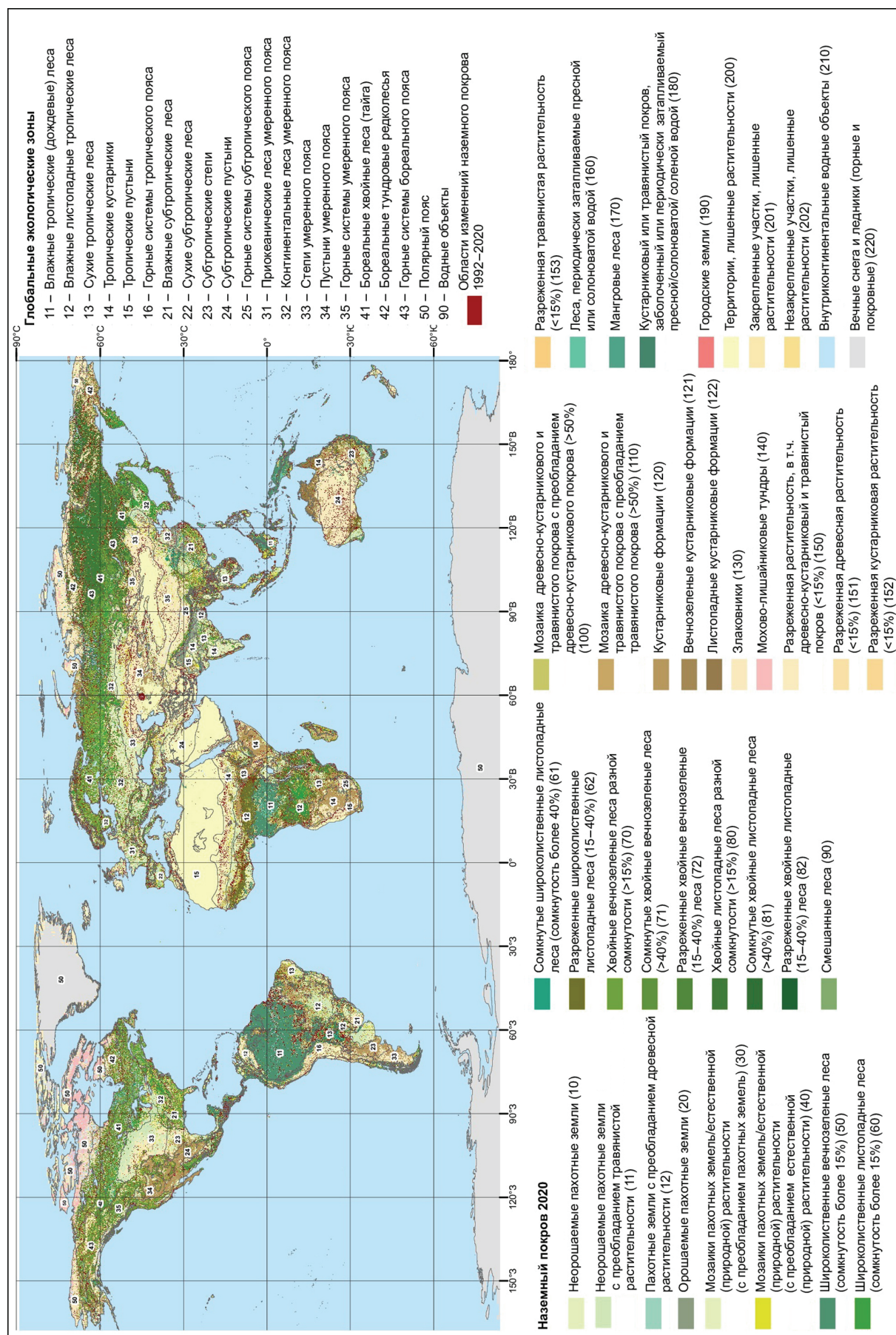


Рис. 1. Области изменений наземного покрова за период 1992–2020 гг.
Fig. 1. Areas of land cover change for the period 1992–2020

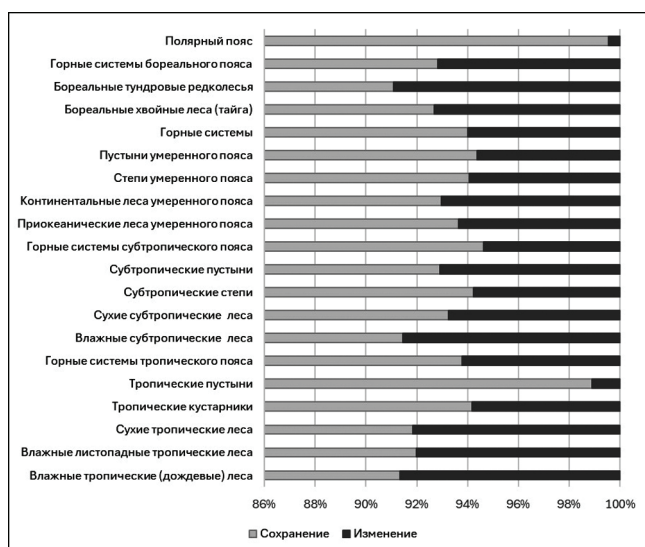


Рис. 2. Доля ареалов изменений наземного покрова в 1992–2020 гг. от общей площади экологических зон (%)

Fig. 2. The share of areas of land cover changes in 1992–2020 from the total area of the ecological zones (%)

Всего было выделено 24 процесса трансформации наземного покрова, которые в границах экологических зон имеют разную структуру и распространение (табл. 1). Жирным шрифтом выделены процессы, на которые приходится более 5% от всей площади изменений). Далее выделенные 24 процесса были сгруппированы в пять направлений трансформации земель, определяющих функционально-динамические особенности текущего развития природно-антропогенных ландшафтов, в том числе их экосистемные функции.

На основе представленных результатов проанализируем зональные и региональные особенности выявленных процессов трансформации¹.

Тропический пояс. В соответствии с классификацией ФАО к этому поясу отнесены территории со среднегодовыми температурами более +18°C. По российской систематике этот пояс (домен) включает экваториальный, субэкваториальный и собственно тропический географические пояса. Это крупнейший пояс в системе глобальных экологических зон (более 30% площади суши), его геоэкологическое значение определяется прежде всего важной ролью в формировании тепло- и влагооборота земного шара, а также высокой продуктивностью экосистем. Одновременно этот пояс (за исключением зоны тропических пустынь) концентрирует значительную часть густонаселенных стран мира, а также представляет собой зону наиболее активной урбанизации на земном шаре. Наибольшие по площади ареалы измене-

ний (не только в поясе, но и на всем земном шаре) приходится на зоны влажных тропических (дождевых лесов) и листопадных лесов. Наземный покров этих зон неоднороден и довольно сильно трансформирован. По нашим расчетам, среди ареалов, не претерпевших изменения, в 2020 г. в зоне дождевых лесов 67% составляли собственно влажные вечнозеленые широколиственные леса (с сомкнутостью крон более 15%), распространены также листопадные леса, затопляемые и заболоченные массивы, мозаики древесно-кустарниковой растительностью с различной долей пашен. Как видно на рис. 1, крупные ареалы изменений охватывают юго-восточную периферию дождевых лесов Амазонии, мозаики лесов и сельскохозяйственных земель на равнинах островов Малайского архипелага, в остальных районах изменения очаговые. В структуре процессов высока роль фрагментации древесного покрова (41% территории, где произошли изменения наземного покрова), связанной с выборочными рубками, подсечно-огневой и переложной системами земледелия, меньшая доля приходится на распашку на месте лесов и мозаик (около 10%). Примерно одинаковую долю (свыше 7%) в структуре процессов вследствие трансформации землепользования имеют зарастание и восстановление лесов на мозаиках.

Зона влажных листопадных тропических лесов (12), лежащая в пределах субэкваториального географического пояса, совпадает с густонаселенными территориями Африки, Южной Америки и Азии. В 1992–2020 гг. здесь зафиксированы существенные изменения наземного покрова (основные классы – широколиственные листопадные леса, неорошаемые пашни, в Азии – орошаемые пашни, разнообразные мозаики). Среди процессов отмечается восстановление лесов на землях, ранее не занятых лесной растительностью (свыше 19%), примерно равен вклад распашки на месте нелесных классов наземного покрова (14%), а также лесов и мозаик с участием древесной растительности (около 12%), фрагментации лесного покрова (13%), сведения лесной растительности на землях, ранее занятых лесами (12,5%).

Зона сухих тропических лесов (13) представлена массивами лесов, мозаиками древесно-кустарникового и травянистого покрова, орошаемыми и неорошаемыми пашнями. Крупные очаги изменений в пределах зоны приурочены к Бразильскому плоскогорью, Восточно-Африканской области и Индокитаю. Отмечаются процессы сведения лесов на ранее лесных землях (24,5%), зарастания лесами территорий, не занятых лесной растительностью (свыше 16%), распашки на месте лесов и мозаик (около 15%) и распашки на месте иных типов наземного покрова (около 13%). Экстенсивное расширение пахотных земель – наиболее выраженная тенденция изменения землепользования.

¹ Из рассмотрения исключен полярный пояс ввиду неполной представленности в базе данных материалов, характеризующих изменение площадей, занятых вечными снегами и ледниками, а следовательно, и другими типами наземного покрова.

Таблица 1

**Процессы и направления изменений, обусловленные трансформацией наземного покрова/землепользования
за период 1992–2020 гг., % от площади экологической зоны**

		Тропический пояс										Субтропический пояс										Умеренный пояс										Бореальный пояс			
		11*	12	13	14	15	16	21	22	23	24	25	31	32	33	34	35	41	42	43															
	Экологические зоны																																		
	Процессы трансформации																																		
I	1 Деградация пахотных земель	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0															
	Полная утрата растительности																																		
	2 на лесных землях	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,7	0,6	0,1	1,3	0,1	0,2	0,7	0,4	1,4	0,5	1,0	3,3															
	3 травяных и кустарниковых формаций	0,0	0,1	0,2	18,9	20,1	5,8	0,0	0,7	1,7	24,9	9,0	0,1	0,0	5,5	6,9	12,8	0,1	0,6	1,1															
	4 сведение древесной растительности на землях, ранее занятых лесами	5,7	12,5	24,5	4,5	0,6	8,3	10,3	7,4	7,3	4,0	13,2	7,7	6,7	4,4	2,6	17,0	16,3	15,2	33,0															
	Заращение																																		
	5 земель, ранее лишенных растительности	0,0	0,0	0,2	29,2	31,6	11,4	0,0	2,3	15,5	13,0	14,4	0,0	0,0	3,8	41,2	15,7	0,1	1,0	0,9															
	6 земель с разреженной растительностью	0,0	0,0	0,1	12,3	17,9	3,3	0,0	0,6	4,0	44,4	2,3	0,0	0,1	11,5	12,4	4,3	1,8	18,2	3,5															
	7 обрабатываемых неорошаемых пахотных земель	1,6	3,3	2,9	3,4	0,4	4,0	3,7	4,6	2,9	0,2	2,9	7,5	6,6	3,9	0,4	1,9	0,6	0,0	0,3															
	8 регулярно обрабатываемых орошаемых земель	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,2	0,6	0,3	0,0	0,0	0,0															
	9 использовавшихся под плантации	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0															
	10 мозаик сельскохозяйственных земель и естественной растительности	7,6	5,1	2,9	1,4	0,1	5,0	7,8	2,9	0,6	0,0	2,2	6,6	6,5	1,7	0,4	2,6	0,9	0,0	0,9															
	11 Лесовосстановление на мозаиках разного типа	7,2	7,5	6,8	2,4	0,6	12,9	6,4	11,5	2,3	0,6	11,5	8,4	12,9	1,7	0,5	7,1	4,7	6,6	6,0															
	Заращение лесами территорий																																		
	12 с разреженной или полным отсутствием растительности (облесение)	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1,3	10,1	3,5															
	13 ранее не занятых лесной растительностью	5,1	19,2	16,1	7,8	1,5	16,5	6,7	5,1	1,3	4,7	9,2	4,4	3,1	12,8	5,8	6,3	3,7	13,2	7,8															
III	14 Закустаривание	0,1	1,3	2,1	2,2	1,3	1,4	0,6	1,7	2,1	0,8	0,4	0,2	0,0	1,5	0,2	0,4	0,7	1,2	1,8															
	15 Изменение породного состава лесов	2,1	0,9	0,1	0,0	0,0	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,2	0,4	0,2	0,8															
	16 Фрагментация древесного покрова	40,8	13,0	8,6	0,6	0,1	13,0	22,2	11,1	1,8	0,4	6,8	14,9	11,0	1,9	0,5	8,9	19,8	10,8	25,5															
	17 Осушение водоемов	0,8	0,6	0,7	0,5	3,0	0,4	1,1	0,6	0,5	1,5	0,5	0,9	0,6	1,0	1,8	0,5	3,4	3,4	0,7															
IV	18 Осушение переувлажненных земель	4,6	1,6	1,0	0,1	0,0	0,5	2,6	0,9	0,2	0,2	0,1	1,5	6,0	0,2	0,1	1,4	25,2	9,6	3,7															
	19 Частичное подтопление и заболачивание	6,1	3,7	1,6	0,3	0,1	0,7	1,7	0,2	0,3	0,1	0,2	0,6	1,2	0,3	0,1	0,4	11,4	4,7	4,0															
	20 Полное затопление	3,6	1,7	0,8	0,6	2,3	0,4	1,2	1,6	0,8	0,4	0,9	1,3	2,0	1,3	1,1	1,6	4,1	3,9	0,8															

Окончание таблицы 1

		Тропический пояс							Субтропический пояс							Умеренный пояс							Бореальный пояс			
		11*	12	13	14	15	16	21	22	23	24	25	31	32	33	34	35	41	42	43						
V	Экологические зоны																									
	Распашка на месте																									
	21 лесов и мозаик с участком древесной растительности	9,8	11,9	14,7	0,4	0,1	7,6	10,2	8,2	1,4	0,1	4,0	9,4	16,1	1,1	0,3	3,7	3,7	0,1	1,3						
	22 иных типов наземного покрова	1,0	14,0	12,9	11,4	10,1	4,9	3,8	18,2	19,6	2,3	14,0	4,8	3,7	39,2	20,9	6,5	0,6	0,0	0,6						
	23 Осушение и распашка	1,0	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	1,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0						
24	Рост площади городских земель	2,4	2,8	3,1	3,3	9,0	3,0	19,2	20,1	7,3	2,0	5,9	30,8	22,5	6,6	3,2	6,6	0,6	0,0	0,5						

Примечание. Направления изменений: I – снижение или утрата продуктивности, в т. ч. опустынивание и обезлесивание; II – экореабилитация и лесовосстановление; III – нарушение и трансформация лесной и кустарниковой растительности; IV – осушение и затопление территории; V – расширение антропогенно модифицированных и техногенных ландшафтов.

* Нумерация зон соответствует рис. 1.

Зона тропических кустарников (14) (фактически семиаридные области субэкваториального тропического географического пояса), представленная в основном в Африке и Южной Азии, характеризуется разными классами наземного покрова – от орошаемых пашен в Индии до земель с разреженной древесно-кустарниковой растительностью (<15%) в Сахеле, где отмечается четкая субширотная концентрация изменений наземного покрова. Наибольшие изменения связаны с процессом зарастания земель, лишенных растительности и с разреженной растительностью (свыше 29 и 12%), утраты растительности травяных и кустарниковых формаций (около 19%) и распашки (свыше 11%).

Наиболее засушливая и наименее продуктивная зона тропических пустынь (15) в Африке и Азии изменена незначительно, отдельные очаги трансформации наземного покрова имеются на Аравийском полуострове и, в больших масштабах, по периферии пустыни Намиб. Набор процессов практически такой же, как в зоне тропических кустарников. Среди ключевых – зарастание земель, лишенных растительности (около 32% от всей площади изменений), утрата растительности травяных и кустарниковых формаций (более 20%), зарастание земель с разреженной растительностью (около 18%) и распашка (10%).

Горные системы тропиков (16) характеризуются разнообразными процессами, обусловленными широким распространением гор – Центральной Америки до Новой Гвинеи. В результате трансформации землепользования здесь отмечаются процессы зарастания лесами территорий, ранее не занятых лесной растительностью (16,5%), закустаривания (13%), лесовосстановления на мозаиках (около 13%), а также зарастания земель, лишенных растительности (свыше 11%).

Субтропический пояс. Наибольшие изменения наземного покрова затронули зоны влажных и сухих лесов (21, 22), где представлены орошаемые и неорошаемые пашни, мозаики с преобладанием пашен и леса. Основные ареалы изменений сконцентрированы в густонаселенных областях Восточного Китая, особенно вдоль побережья, а также на юге Пиренейского полуострова, в прибрежных районах Малой Азии, на юго-востоке США, в меньшей степени – в Уругвае. Основные процессы в зоне влажных субтропических лесов – фрагментация древесного покрова (22%), рост городской застройки (19%) и расширение распашки на месте лесов и мозаик (свыше 10%). В зоне сухих лесов преобладают процессы роста городской застройки (свыше 20%) и распашки (18%). Примерно одинаковая доля (по 10%) приходится на процессы фрагментации древесного покрова и лесовосстановления на мозаиках.

Субтропические степи (23) в Северной и Южной Америке представлены мозаиками древесно-кустарникового и травянистого покрова с преобладанием последнего (>50%), в Передней Азии тип наземного покрова отличается: здесь доминируют пашни и мозаики с преобладанием обрабатываемых земель. Отдельные очаги изменений имеются в степной зоне в южной части Великих равнин, в центральной части Аргентины, в Плодородном полумесяце (Сирии и Ираке). Отмечаются два основных процесса – распашка территорий (на 19,6%) и зарастание земель, лишенных растительности (15,5%); второй связан с появлением растительности на залежах, обычно практикуемых в системе богарного земледелия в субтропиках.

Пустыни субтропиков (24) по структуре наземного покрова также отличаются по материкам – в Северной Америке широко распространен класс мозаик древесно-кустарникового и травянистого покрова с преобладанием травяного покрова (>50%), а в Азии – земли, лишенные растительности. Изменения наземного покрова в пустынях отмечаются в основном на западе Ирана и в Высоком Атласе. Абсолютно преобладает процесс зарастания земель с разреженной растительностью (свыше 44% изменившихся ячеек), а также утраты растительности травяных и кустарниковых формаций (25%). В горах субтропиков (25) изменения отмечаются на всех материках, как очаговые, так и крупнодисперсные (как, например, в горах на юге Китая).

Умеренный пояс. Лесные зоны характеризуются равномерно-дисперсной трансформацией наземного покрова (представлен разными типами суббореальных лесов, мозаик и пашен). В зоне приокеанических лесов (31), выделяемой в Западной Европе, Чили, Новой Зеландии, основной процесс, отмечаемый на 31% всех измененных ячеек, – расширение городской застройки. Далее следуют фрагментация лесного покрова (15%) и распашка на месте лесов и мозаик с участием древесной растительности (9,4%). В континентальных лесах умеренного пояса (32), отличающихся более разнообразным наземным покровом, наибольшая концентрация изменений приурочена к северной периферии лесной зоны в европейской части России и на юге Западной Сибири, в меньшей – к востоку США и северо-востоку Китая. В данной зоне лидируют два процесса: на 22,5% всех измененных ячеек зафиксировано увеличение площадей под городской застройкой и на 16% – распашка на месте лесов и мозаик с участием древесной растительности. Отмечается также лесовосстановление на мозаиках сельскохозяйственных угодий и естественной растительности, мозаиках древесно-кустарниковой и травяной растительности (на 13% ячеек), что характерно для стран Евро-

пы, Китая, США, а также фрагментация древесного покрова (11%).

В степной зоне (33) на всех материках доминируют классы наземного покрова неорошаемых пашен с травянистым покровом (посевы зерновых), мозаики пахотных земель и разреженная травяная растительность. Наибольшее скопление ячеек с изменениями отмечается вдоль северной границы Казахстана и в пределах Казахского мелкосопочника; в степной зоне Северной Америки плотность изменений существенно меньше, в основном они сконцентрированы на Великих равнинах в США, близ Скалистых гор. Набор процессов, связанных с изменениями землепользования, иной. Здесь абсолютно преобладает процесс распашки (39%), а также зарастания лесами земель, ранее не занятых растительностью (около 13%), и зарастания земель с разреженной растительностью (11,5%). Расширение городской застройки проявилось на 6,6% ячеек с изменениями наземного покрова. Таким образом, расширение обрабатываемых площадей по-прежнему играет основную роль в трансформации ландшафтов степной зоны.

Зона пустынь умеренного пояса (34) представлена, в основном, землями с разреженной травяной растительностью, лишенными растительности и мозаиками с преобладанием травяного покрова. Наземный покров изменен неравномерно: мелкодисперсные очаги имеются в Северной Америке, очень высокая плотность изменений отмечается в бассейне Аральского моря, меньшая – вдоль северной периферии пустынь Казахстана. Центральные части огромной пустынной зоны в Китае и Монголии вообще не претерпели изменений, за исключением периферических частей, прилегающих к горному обрамлению Тянь-Шаня и Куньлуня. Основные процессы, происходящие в пустынной зоне – зарастание земель, ранее лишенных растительности (на 41% ячеек с изменениями), распашка (около 21%) и зарастание земель со скудной, разреженной растительностью (12%). Таким образом, в пустынной зоне умеренного пояса доминируют процессы зарастания, что соответствует тренду на позеленение аридных территорий, выявленных на основе анализа NDVI.

Горные ландшафты умеренного пояса (35) в горах Евразии, Кордильерах, на юге Анд трансформированы очагово, что свидетельствует о сложившейся устойчивой структуре землепользования. Иная ситуация на Тибетском нагорье, где концентрация изменений в западных и центральных областях намного выше, чем на востоке. Доминирующим процессом является сведение лесной растительности на ранее лесных землях, которое отмечается на 17% площади изменений,

далее – зарастание земель, ранее лишенных растительности (на 15,7%), что, вероятно, отражает снижение хозяйственной нагрузки и влияние климатических изменений, на 13% фиксируется полная утрата травяных и кустарниковых формаций, характеризующая горные территории, испытывающие перевыпас и воздействие экзодинамических процессов. Около 9% изменившихся ячеек отражает процесс фрагментации горных лесов.

Бореальный пояс. Наибольшая концентрация изменений сосредоточена в зоне тундровых редколесий (лесотундры) (42), наземный покров которой, как у переходной зоны, достаточно пестрый: таежные леса, мохово-лишайниковые тундры и разреженная растительность, в т. ч. древесно-кустарниковый и травянистый покров (<15%). Изменения в зоне лесотундры фиксируются, в основном, близ ее северной и южной границ. Основные процессы, которые обусловлены выявленными переходами классов наземного покрова – осушение переувлажненных земель (свыше 18%), исчезновение лесной растительности на землях, ранее занятых лесами (15%), зарастание лесами безлесных территорий (свыше 13%), фрагментация древесного покрова (около 11%) и зарастание лесами территорий с разреженной растительностью или ее полным отсутствием (около 11%). Таким образом, для зоны тундровых редколесий характерны разнонаправленные процессы, которые имеют противоположные геоэкологические последствия. С одной стороны, на 41% всех измененных ячеек зафиксировано увеличение биомассы, развитие древесной растительности с учетом продвижения лесов на север, с другой, на 27% – деградация и снижение продуктивности экосистем.

В зоне тайги (41) с более однородной структурой наземного покрова (только в южных частях зоны появляются ареалы мозаик) изменения равномерны в Северной Америке, Европе, Западной и Средней Сибири. В Восточной Сибири наибольшие изменения затронули преимущественно северную периферию таежной зоны, а ее центральные ареалы почти полностью сохранились. Наиболее выраженные процессы, связанные с изменением землепользования в зоне тайги – прекращение режима заболачивания и зарастание лесами, часто редкостойными, на 25% всех измененных площадей, фрагментация древостоев (на площади свыше 20%), сведение лесов (16%), частичное подтопление и заболачивание лесов (11%). Горные ландшафты бореального пояса (43) с мозаичной структурой наземного покрова претерпели особенно сильные изменения в горах Забайкалья, Аляски и Северной Канады.

Таблица 2

Направления изменений наземного покрова и их основные геоэкологические последствия*

Направления изменений**	Геоэкологические последствия	Доля от мировых изменений, %
I. Снижение или утрата продуктивности, в т. ч. опустынивание и обезлесивание (1–4)	- Нарушение продукционных, поддерживающих и регулирующих экосистемных функций, в т. ч. снижение запасов углерода в растительности и почвах, нарушение биоразнообразия; - активизация процессов деградации земель (ускоренная эрозия, дефляция и др.); - увеличение потоков явного тепла, нарушение влагооборота в приземной атмосфере и т. п.	17
II. Экоореабилитация и лесовосстановление (5–13)	- Увеличение запасов биомассы и выполнения поддерживающих и регулирующих функций, в т. ч. сохранение и увеличение биоразнообразия, накопление углерода в растительности и почвах, сокращение интенсивности процессов эрозии; - увеличение потоков скрытого тепла; - поддержание влагооборота; - снижение запыленности в приземной атмосфере, сокращение альбедо поверхности и т. п.	35
III. Нарушение и трансформация лесной и кустарниковой растительности (14–16)	Изменение (снижение) запасов биомассы, выполнения поддерживающих и регулирующих функций, в т. ч. изменение характеристик биоразнообразия, нарушение накопления углерода в растительности и почвах	17
IV. Осушение и затопление территории (17–20)	- Изменение доли гидроморфных ландшафтов и водоемов, водного баланса территорий; - изменение продукционных, поддерживающих и регулирующих функций, в т. ч. изменение характеристик биоразнообразия; - накопление углерода при подтоплении и заболачивании, высвобождение CO₂ и метана при затоплении	10
V. Расширение антропогенно модифицированных и техногенных ландшафтов (21–24)	- Изменение продукционных, поддерживающих и регулирующих экосистемных функций, в т. ч. снижение запасов углерода в растительности и почвах; - развитие процессов деградации, в том числе дегумификации почв на пахотных землях; - увеличение потоков явного тепла, нарушение влагооборота в приземной атмосфере (при орошении – увеличение восходящих потоков влаги и скрытого тепла), при городской застройке – увеличение альбедо, усиление загрязнения и запыленности атмосферы, изменение теплового режима	21

Примечание. * Таблица составлена авторами с использованием статей [Курганова и др., 2019; Climate Change..., 2017; Fryer, Williams, 2021; Mekon et al., 2022; Xiao et al., 2023] и других источников. ** В скобках указаны процессы трансформации, см. табл. 1.

Как указывалось выше, выявленные процессы были объединены в пять групп по геоэкологической направленности изменений наземного покрова (их группировку см. в табл. 1). Они отражают общие ландшафтно-геоэкологические последствия, влияющие на экосистемные функции (табл. 2).

Для суши земного шара (полярная зона исключена из расчетов) направления I и V в целом могут быть оценены как негативные с точки зрения экосистемных функций и утраты биопродуктивности; на них суммарно приходится 38% территории всех выявленных изменений наземного покрова. Процессы, которые можно охарактеризовать как позитивные, представлены в направлении II; они характерны для

35% территорий с изменениями. Необходимо отметить, что расширение антропогенно модифицированных и техногенных ландшафтов (направление V) может в то же время приводить к росту продуктивности сельскохозяйственных земель, расширению зеленых насаждений в городах и др. Направления III и IV отражают как антропогенные изменения (например, фрагментация лесов), так и процессы естественной динамики ландшафтов (изменения породного состава лесов). На оба направления приходится 27% площадей, подвергшихся изменениям.

Направления изменений наземного покрова были рассмотрены также и в границах экологических зон. Для этого были суммированы площади

процессов по выделенным пяти направлениям, рассчитана их доля от площади зон. На диаграмме (рис. 3) отражена общая площадь трансформации наземного покрова/землепользования за период 1992–2020 гг. для каждой из зон и вклад основных направлений в ее структуру.

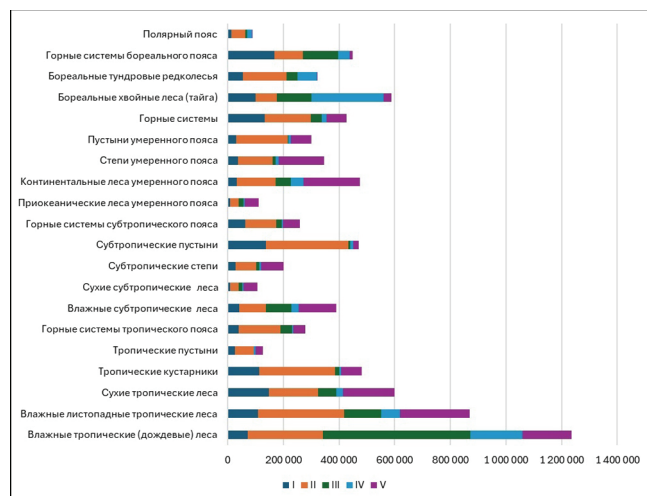


Рис. 3. Основные направления изменений наземного покрова в границах экологических зон, км² (нумерация направлений приведена в табл. 1)

Fig. 3. Main directions of changes in land cover within the boundaries of ecological zones, km² (the numbering of directions is given in Table 1)

Расширение площадей антропогенно модифицированных и техногенных ландшафтов (V) в наибольшей степени характерно для пяти экологических зон: влажных листопадных тропических лесов, континентальных лесов умеренного пояса, сухих тропических лесов, влажных тропических (дождевых) лесов, степей умеренного пояса (в каждой зоне – более 160 тыс. км²). В зонах степей субтропического и умеренного поясов, континентальных и приокеанических лесов умеренного пояса и сухих субтропических лесах вклад этого направления в общую структуру изменений достигает более 40%.

Второе из негативных по своим экосистемным последствиям направлений – снижение или утрата продуктивности растительного покрова, в т. ч. опустынивание и обезлесивание (I) – гораздо шире представлено в аридных областях. Наибольшие ареалы отмечены в зонах тропических кустарников, субтропических пустынь и сухих тропических лесов, а также в горных системах умеренного и boreального пояса. Утрата растительного покрова сопровождается ускоренным развитием экзогенных процессов. В горных системах субтропического, умеренного и boreального поясов, а также в зонах сухих тропических лесов и субтропических пустынь вклад этого направления составляет 25% и более.

К позитивной тенденции можно отнести то, что в 11 из 20 рассмотренных зон на направление экореконструкции и лесовосстановления приходится более 35% всех изменений. Наибольший вклад процессов этой группы отмечается в зонах пустынь субтропического, умеренного и тропического поясов, тропических кустарников и горных систем тропического пояса. Однако во влажных лесных зонах всех поясов доля этих процессов существенно ниже, их вклад составляет всего от 13 (бореальные хвойные леса) до 27% (приокеанические леса умеренного пояса).

Доля процессов, приводящих к нарушению и трансформации древесной и кустарниковой растительности, за счет активного развития процесса фрагментации древесной растительности также выше всего в лесных зонах. Наиболее высокие значения почти (43% от всей площади изменений) характерны для зоны влажных тропических (дождевых) лесов, в других зонах вклад этого направления не превышает 13–20%. Процессы, направленность которых связана с осушением и затоплением территории, в абсолютном большинстве зон (17 из 20) играют незначительную роль. Существенно выше их значение только в трех зонах: бореальные хвойные леса (тайга) (44%), тундровые редколесья (22%) и влажные тропические (дождевые) леса (15%).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ранее интенсивно освоенные зоны – влажных лесов во всех поясах и степей – по-прежнему продолжают подвергаться активной трансформации, а процессы экореконструкции и лесовосстановления играют в них значимо меньшую роль.

ВЫВОДЫ

Разновременные данные о состоянии наземного покрова ESA CCI LC представляют собой хорошую информационную базу для выявления процессов трансформации как на зональном уровне, так и на уровне регионов. В ряде случаев (северная часть таежной зоны, юго-восточная граница Амазонии, Сахельская зона, острова Малайского архипелага и т. д.) ячейки с изменениями образуют сплошные ареалы, пригодные для делимитации природных экологических зон со стабильной или динамичной обстановкой. В то же время для адекватной оценки изменений в полярном поясе необходимо использование дополнительных источников геопространственной информации, в частности по изменению площади снежно-ледовых областей и мохово-лишайниковых тундр.

Полученные результаты в целом отражают качественные и количественные изменения, произошедшие в наземном покрове суши земного шара за 1992–2020 гг. и согласуются с данными аналогич-

ных исследований. Несколько переоценена, судя по полученным результатам, роль процесса деградации пахотных земель, на который ни в одной из рассматриваемых зон не приходится более 1% от всей площади изменений. В субтропических и тропических пустынях процесс утраты растительного покрова в тридцатилетней ретроспективе играет меньшую роль в структуре изменений по сравнению с процессами зарастания территорий с разреженной растительностью, что косвенно может свидетельствовать о стабилизации процесса опустынивания земель в глобальном масштабе.

Наибольший интерес для анализа представляют многосоставные направления трансформации, которые обусловлены разнообразными процессами, выделенными по нескольким переходам классов наземного покрова. В целом, эти процессы можно трактовать как геоэкологические, т. к. они обусловлены динамикой социально-экономической ситуа-

ции, институциональными изменениями, сдвигами моделей потребления и природными явлениями. Все изменения наземного покрова сопровождаются сдвигами продукционных характеристик ландшафтов, их экосистемных функций, в том числе в сфере поддержания биоразнообразия и депонирования углерода. Таким образом, анализ трансформации наземного покрова создает основу для дальнейших ландшафтно-экологических исследований.

Трансформация форм землепользования, интенсификация или снижение хозяйственных нагрузок – важные факторы, которые необходимо учитывать при разработке регионально-ориентированных рекомендаций управления природно-антропогенными ландшафтами, для решения экологических проблем, в том числе в сфере сохранения биоразнообразия и экосистемных услуг, при планировании стратегий низкоуглеродного развития.

Благодарности. 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 РАН. Серия геогр. 2017. № 1. С. 126–139.
- Алексеева Н.Н., Климанова О.А., Третьяченко Д.А. и др. Траектории трансформации земельного покрова в зональных типах ландшафтов Индокитая // Известия РГО. 2019. № 4. С. 1–14.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Климанова О.А., Третьяченко Д.А., Алексеева Н.Н. и др. Трансформация земельного покрова на глобальном уровне в 2001–2012 гг.: картографирование и анализ изменений // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 5–13.
- Курганова И.Н., Семенов В.М., Кудеяров В.Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах // Доклады РАН. 2019. Т. 489. № 6. С. 646–650.
- Романова Э.П., Алексеева Н.Н., Аришинова М.А. и др. Новая карта мира «Географические пояса и природные зоны суши Земли» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 4. С. 3–11.
- Afuye G.A., Nduku L., Kalumba A.M. et al. Global trend assessment of land use and land cover changes: A systematic approach to future research development and planning. *J. of King Saud University – Science*, 2024, vol. 36, 103262, DOI: 10.1016/j.jksus.2024.103262.
- Castilla G., Hay G. Uncertainties in land use data, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, vol. 11, iss. 6, p. 1857–1868, DOI: 10.5194/hess-11-1857-2007.
- Chen W., Chi G., Li J. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015, *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 669, p. 459–470.
- Climate Change and Land*, IPCC special. report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial Ecosystems, Summary for Policymakers, 2019, 874 p.
- Fernandes M.M., Fernandes M.R.M., Garcia J.R. et al. 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, 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.
- Global Ecological Zones for FAO Forest Reporting: 2010*, Forest Resources Assessment Working Paper 179 Update, Rome, 2012, 42 p.
- Klimanova O., Naumov A., Greenfieldt Y. et al. Recent regional trends of land use and land cover transformations in Brazil, *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, vol. 10(4), p. 98–116, DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-98-116.
- Li J., Dong S., Li Y. et al. Effects of land use change on ecosystem services in the China–Mongolia–Russia economic corridor, *J. of Cleaner Production*, 2022, vol. 360, 132175, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132175.
- Li W., Ciais P., MacBean N. et al. Major forest changes and land cover transitions based on plant functional types derived from the ESA CCI Land Cover product, *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, vol. 47, p. 30–39.
- Mekon Z.A., Kafy A.A., Saha M. Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat

- island and carbon emission in Penang city, Malaysia, *Building and Environment*, 2022, vol. 222, 109335, DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109335.
- Niu Z., He H., Peng S. et al. A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services, *J. of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, vol. 13, e2020MS002451, DOI: 10.1029/2020MS002451.
- Potapov P., Hansen M.C., Pickens A. et al. The global. 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, vol. 3, 856903, DOI: 10.3389/frsen.2022.856903, URL: <https://glad.umd.edu/users/Potapov/GLCLUC2020/frsen-03-856903.pdf>.
- Radwan T.M., Blackburn A., Whyatt J.D. et al. Global land cover trajectories and transitions, *Nature Sci. Reports*, 2021, vol. 11, 12814, DOI: 10.1038/s41598-021-92256-2.
- Reinhart V., Fonte C.C., Hoffmann P. et al. Comparison of ESA climate change initiative land cover to CORINE land cover over Eastern Europe and the Baltic States from a regional. climate modeling perspective, *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, vol. 94, 102221, DOI: 10.1016/j.jag.2020.102221.
- Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The emergence of land change science for global. environmental. change and sustainability, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2007, vol. 104, p. 20666–20671.
- Wang Y., Sun Y., Cao X., et al. 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.
- Xiao J., Song F., Su F. et al. Quantifying the independent contributions of climate and land use change to ecosystem services, *Ecological Indicators*, 2023, vol. 153, 110411, DOI: 10.21203/rs.3.rs-2357146/v1.
- Zhang F., Xu N., Wang C. et al. 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, 102948.

Электронные ресурсы

- Global. Ecological. Zones (second edition), URL: <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset> (дата обращения 11.05.2024).
- National Snow and Ice Data Center, URL: <https://nsidc.org/news-analyses/scientific-analyses/about-our-analyses> (дата обращения 03.08.2024).
- Product Quality Assessment Report ICDR Land Cover 2016–2020, Copernicus Climate Change Service, URL: https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D5.2.2_PQAR_ICDR_LC_v2.1.x_PROD-UCTS_v1.0.pdf (дата обращения 27.07.2024).
- The European Space Agency. MRLC maps series from 1992 onwards (v207 and v2.1.1), URL: [https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/data/#mrlc-maps-series-from-1992-onwards-\(v207-and-v2.1.1\)](https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/data/#mrlc-maps-series-from-1992-onwards-(v207-and-v2.1.1)) (дата обращения 11.05.2024).

Поступила в редакцию 05.09.2024

После доработки 10.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

GEOECOLOGICAL EFFECTS OF LAND COVER CHANGES DURING 1992–2020

D.A. Tretyachenko¹, O.A. Klimanova², N.N. Alekseeva³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Physical Geography of the World and Geoecology

¹ Engineer; e-mail: daria.trt@gmail.com

² Prof., D.Sc. in Geography; e-mail: oxkl@yandex.ru

³ Acting Head of the Department, Associate Prof., Ph.D. in Geography; e-mail: nalex01@mail.ru

The transformation of land use and land cover that results from increasing anthropogenic pressure is a most important factor of global environmental change. Numerous studies have been carried out on global, continental, country scale, as well as for individual regions and cities. Much less frequently, the dynamics of land cover and the associated processes are studied within the boundaries of natural landscapes. Meanwhile, it is this approach that allows us to determine the zonal specifics of geoecological processes caused by land use and land cover changes. Therefore the purpose of the article is to determine significant directions of the global land cover transformation within the boundaries of ecological zones over a thirty-year period (1992–2020). Geospatial data from the European Space Agency's Climate Change Initiative ESA CCI LC were used as a source. The study included several stages: 1) inventory and mapping of the areas of land cover change and types of transitions between different land cover classes during 1992–2020 for 20 ecological zones (the database includes 11 thousand areas characterized by 7 parameters, namely transition type, process coding, initial and final land cover class, number of cells, number of areas, area of changes); 2) grouping of the identified 867 types of transitions according to the transformation processes and analysis of the manifestation of processes in each ecological zone; 3) assessment of the direction of identified changes and their possible geoecological consequences. As a result, the main geoecological processes of land cover transformation were determined, and their zonal specificity was identified, including differences in their manifestation in forest and treeless zones, and within

the mountain systems of various belts. It has been found that about 17% of territories with land cover changes are characterized by a decrease or loss of biological productivity, which are a consequence of desertification and deforestation of lands. 21% of such territories have underwent the expansion of the area of anthropogenically modified and technogenic landscapes. About a third of all changes are characterized by the processes of eco-rehabilitation and restoration of the ecological potential of lands. The identified areas of changes could be considered as stages of dynamic transformation of natural-anthropogenic systems and modification of their ecosystem functions, which require more detailed study.

Keywords: ecological zones, geospatial data, land use changes, transformation processes, geoecological problems

Acknowledgements. The study was performed under the state task 121040100322-8 of the MSU Faculty of Geography.

REFERENCES

- Afuye G.A., Nduku L., Kalumba A.M. et al. Global. trend assessment of land use and land cover changes: A systematic approach to future research development and planning, *J. of King Saud University – Science*, 2024, 36, 103262.
- Alekseeva N.N., Klimanova O.A., Khazieva E.S. Global'nye bazy dannyh zemel'nogo pokrova i perspektivy ih ispol'zovaniya dlja kartografirovaniya sovremennyh landshaftov [Global land cover databases and prospects for their use for mapping modern landscapes], *Izvestija RAN. Ser. Geograficheskaja*, 2017, no. 1, p. 126–139. (In Russian)
- Alekseeva N.N., Klimanova O.A., Tretyachenko D.A., Bancheva A.I. Traektorii transformacii zemel'nogo pokrova v zonal'nyh tipah landshaftov Indokitaja [Land cover transformation trajectories in zonal landscape types of Indochina], *Izvestiya RGO*, 2019, no. 4, p. 1–14. (In Russian)
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V. et al. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannyh spektrometri MODIS [Satellite mapping of the vegetation cover of Russia based on MODIS spectroradiometer data], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 4, p. 285–302. (In Russian)
- Castilla G., Hay G. Uncertainties in land use data, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, vol. 11, iss. 6, p. 1857–1868.
- Chen W., Chi G., Li J. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015, *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 669, p. 459–470.
- Climate Change and Land*, IPCC special. report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial Ecosystems, Summary for Policymakers, 2019, 874 p.
- Fernandes M.M., Fernandes M.R.M., Garcia J.R. et al. 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, 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.
- Global Ecological Zones for FAO Forest Reporting: 2010*, Forest Resources Assessment Working Paper 179 Update, Rome, 2012, 42 p.
- Klimanova O., Naumov A., Greenfieldt Y. et al. Recent regional. trends of land use and land cover transformations in Brazil, *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, vol. 10(4), p. 98–116.
- Klimanova O.A., Tretyachenko D.A., Alekseeva N.N. et al. Land cover transformation at a global level during 2001–2012: mapping and analysis of changes, *Geography and Natural Resources*, 2018, no. 3, p. 189–196.
- Kurganova I.N., Semenov V.M., Kudryarov V.N. Klimat i zemlepol'zovanie kak ključevye faktory stabil'nosti organicheskogo veshhestva v pochvah [Climate and land use as key factors of organic matter stability in soils], *Dokl. Akademii nauk*, 2019, vol. 489, no. 6, p. 646–650. (In Russian)
- Li J., Dong S., Li Y. et al. Effects of land use change on ecosystem services in the China–Mongolia–Russia economic corridor, *J. of Cleaner Production*, 2022, vol. 360, 132175.
- Li W., Ciais P., MacBean N. et al. Major forest changes and land cover transitions based on plant functional. types derived from the ESA CCI Land Cover product, *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, vol. 47, p. 30–39.
- Mekon Z.A., Kafy A.A., Saha M. Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia, *Building and Environment*, 2022, vol. 222, 109335.
- Niu Z., He H., Peng S. et al. A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services, *J. of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, vol. 13, e2020MS002451.
- Potapov P., Hansen M.C., Pickens A. et al. The global. 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, no. 3, 856903.
- Radwan T.M., Blackburn A., Whyatt J.D., Atkinson P.M. Global. land cover trajectories and transitions, *Nature Sci. Reports*, 2021, no. 11, 12814.
- Reinhart V., Fonte C.C., Hoffmann P., et al. Comparison of ESA climate change initiative land cover to CORINE land cover over Eastern Europe and the Baltic States from a regional. climate modeling perspective, *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, no. 94, 102221.
- Romanova E.P., Alekseeva N.N., Arshinova M.A. et al. Novaja karta mira Geograficheskie pojasa i prirodnye zony sushi Zemli [A new map of Geographical Belts and Natural Zones of the Earth], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 4, p. 3–11. (In Russian)
- Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The emergence of land change science for global. environmental. change and sustainability, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2007, vol. 104, p. 20666–20671.

- Wang Y., Sun Y., Cao X. et al. 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.
- Xiao J., Song F., Su F. et al. Quantifying the independent contributions of climate and land use change to ecosystem services, *Ecological Indicators*, 2023, vol. 153, 110411.
- Zhang F., Xu N., Wang C. et al. 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, 102948.
- Web sources*
- Global. Ecological. Zones (second edition), URL: <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset> (access date 11.05.2024).
- National Snow and Ice Data Center, URL: <https://nsidc.org/news-analyses/scientific-analyses/about-our-analyses> (access date 03.08.2024).
- Product Quality Assessment Report ICDR Land Cover 2016–2020, Copernicus Climate Change Service, URL: https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D5.2.2_PQAR_ICDR_LC_v2.1.x_PROD-UCTS_v1.0.pdf (access date 27.07.2024).
- The European Space Agency. MRLC maps series from 1992 onwards (v207 and v2.1.1), URL: [https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/data/#mrlc-maps-series-from-1992-onwards-\(v207-and-v2.1.1\)](https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/data/#mrlc-maps-series-from-1992-onwards-(v207-and-v2.1.1)) (access date 11.05.2024).

Received 05.09.2024

Revised 10.12.2024

Accepted 21.01.2025